雙 月 刊

核能簡訊

NUCLEAR NEWSLETTER

NO. 180
2019 October

以核技術 戰勝登革熱

核能簡訊 NUCLEAR NEWSLETTER
NO. 180
2019.10 雙月刊

編者的話

延續上一期，「窺探藝術油畫背後的秘密(下)」繼續討論如何運用現代輻射技術探究藝術油畫創作的來龍去脈，可說是原子能民生應用最美、最溫柔的一個領域。

我們的生活環境中輻射無所不在，生存在地球上的每個人都與輻射共處，從台北搭機到紐約往返一趟，每小時大約會接受到0.187毫西弗的輻射曝露。我們所吃的食物、土壤、空氣、海洋，甚至自己體內都充滿輻射。輻射並不可怕，在於劑量的多寡；陽光就是一種輻射，和煦的陽光除了可以幫助人體合成維生素D，還能驅散憂鬱；但是過量曝曬，則會造成灼傷，甚至導致皮膚病變。

為了享受陽光的益處，避免造成健康的危害，我們在烈日當空時便需塗抹防曬油、戴帽子，或是撐起遮陽傘，這些都是防護措施。同樣的，處理放射性廢棄物時，需要以層層安全防護措施將放射性物質與人類隔離，我們就不需過度擔憂輻射的影響。

請問讀者們，是否還記得多年前台灣南部發生的汞污泥事件？隨著記憶逐漸淡忘，現在已無人聞問不知所終。在此之後，一批批大量的有害事業廢棄物，一個接著一個在台灣各地陸續被開挖出來，這些有害事業廢棄物的化學劇毒，即使經過萬年也不會有一絲一毫的減少，卻不見有民眾或媒體持續關注這些驚世難題。

然而，人人聞之色變的放射性廢棄物，是會隨著時間的流逝輻射強度逐漸減弱，最終與自然環境的背景值相同。正是因為瞭解輻射的特性，核能從業人員發揮人類的智慧，以極度謹慎的態度，設計出多重障壁的防護機制，即使是高放射性廢棄物也能安全處置。現在法國、瑞典及芬蘭都已選定用過核燃料最終處置場址，法國預計2025年試運轉，芬蘭預計2020年代可以完工啟用，瑞典則是預計2020年開始興建。放射性廢棄物不是無解的難題，真正的難題在於面對輻射時，因過度恐懼、摀耳蒙眼無法理性判斷，讓單純的技術性問題渲染擴大成為複雜的政治性議題。

我們平心靜氣的想想，為什麼法國、瑞典及芬蘭的民眾可以擺脫恐懼的桎梏，讓放射性廢棄物這已高度政治化的複雜難題，重新回歸到單純的技術問題，並且信任專業人士可以安全妥善的處置？

目 錄

出版單位：財團法人核能資訊中心
地　　址：新竹市光復路二段一〇一號
電　　話：（03）571-1808
傳　　真：（03）572-5461
網　　址：http://www.nicenter.org.tw
電子郵件：nicenter@nicenter.org.tw
發 行 人：朱鐵吉
編輯委員：李四海、汪曉康、陳條宗、郭瓊文、劉仁賢、謝牧謙（依筆畫順序）

主　　編：朱鐵吉
文　　編：鍾玉娟、翁明琪、林庭安
執　　編：長榮國際　文化事業本部
設計排版：長榮國際　文化事業本部
地　　址：臺北市民生東路二段 166 號 6 樓
電　　話：02-2500-1175
製版印刷：長榮國際股份有限公司　印刷廠
行政院原子能委員會敬贈　廣告
臺灣電力公司核能後端營運處敬贈　廣告


埃及斑蚊 (圖片來源 : 維基百科)

以核技術戰勝登革熱

文 編輯室

每到夏季，隨著氣溫升高，台灣南部的登革熱疫情也隨之增溫，根據衛福部疾病管制署的統計，2018 年總共有 533 例，2019 年至 9 月中旬已經有 477 例，顯見疫情並未獲得有效控制。

根據《科學人雜誌》的報導，登革熱病毒的散播方式是感染者→病媒蚊→其他人→病媒蚊，如此循環。在台灣，登革熱病媒蚊主要是埃及斑蚊（Aedes aegypti）與白線斑蚊（Aedes albopictus）。埃及斑蚊分布於北回歸線以南的地區，主要棲息於室內的容器以及住家周圍有積水的地方，具有「家棲性」，也就是說有人居住的地方才會有埃及斑蚊。埃及斑蚊的族群會隨雨量變化及人們用水行為而改變。在南台灣，恆春以外的地區年雨量低於 2,000 毫米，屬於半乾燥地區，在 10 月到隔年 4 月屬於旱季，滋生源主要為插花或室內植物的花瓶、花盆底盤、水桶、廢

輪胎等室內外長期積水而且水質清澈的容器。5–9 月，梅雨季之後接連颱風季節，蚊子族群密度隨著雨量而變化。白線斑蚊則分布在全台灣 1,500 公尺以下的山區及平地，白線斑蚊會棲息在戶外植物或陰暗處，孳生源以樹洞、椰子殼等戶外天然容器或廢棄容器內。由此可知埃及斑蚊的棲息處是比較貼近人類的生活範圍，自然的接觸也較為頻繁。

感染登革熱會出現類似流感的症狀，有些病毒株還會導致潛在的致命併發症。同一個人如果先後感染兩種不同型的病毒，之後的這一次感染很容易產生嚴重症狀，稱為出血性登革熱，使得死亡率大幅提升，因此積極的運用各種病媒蚊防制工作顯得迫切而重要。

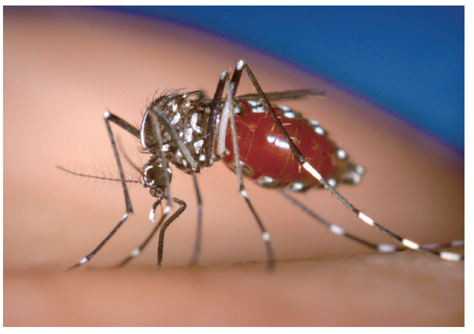
消滅蚊子＝消滅登革熱

來自國際原子能總署（IAEA）和世界衛生組織（WHO）的專家，開始幫助孟加拉評估該國的登革熱疫情，並制訂了一項計畫，測試以核技術對付病媒蚊傳播疾病的抑制效果。

應孟加拉政府要求，國際原子能總署和世界衛生組織的專家最近訪問該國首都達卡，會見了衛生與家庭福利部和科技部的官員，討論使用昆蟲絕育技術（Sterile Insect Technique, SIT）的可能性。SIT 是一種昆蟲生育控制措施，利用輻射對雄性昆蟲進行絕育，再大量釋放與野生雌性昆蟲交配，使其無法產生後代，隨著時間的推移而減少目標昆蟲的數量。

國際專家們與孟加拉官員議定一項為期 4 年的工作計畫，其中包括在 2021–22 年選擇一個可釋放絕育雄蚊的試驗場地，以及聯合國糧農組織 (FAO) 與國際原子能總署合作的技術援助計畫，培訓該國工作人員，將現有設施規模升級之後對雄蚊進行





左：白線斑蚊會傳播登革熱、茲卡病和黃熱病等疾病。(圖片來源：D. Calma / IAEA)。
右：白線斑蚊 (圖片來源：維基百科)

培養與絕育，並在釋放之前先收集基線數據 (baseline data)。

利用核技術的生物遺傳工程

「昆蟲絕育技術已經成功地應用於那些對重要農業造成嚴重傷害的害蟲上，目前正在改良適用於對抗蚊子。」糧農組織 / 國際原子能總署糧食和農業核技術聯合司昆蟲學家何瑞若（Rafael Argiles Herrero）說，「這方法對目標物種的效果非常具體，對其他生物或環境則沒有影響。」

孟加拉是一個擁有約 1.6 億人口的國家，自 2000 年開始記錄登革熱病例以來，現正面臨最嚴重的登革熱疫情。自今 (2019) 年 1 月開始計算，這個南亞國家的病例數已增加到 38,000 多個，最近幾週醫院的登革熱病患，每天新增超過 1,500 例。自今年年初以來，疫情已造成 40 多人死亡。

孟加拉已經在 2008 年依據糧農組織 / 國際原子能總署的計畫建立了蚊子培育室，對 SIT 的應用進行基礎研究，該國食品和輻射生物學研究所所長兼首席科學長馬夫札汗（Mahfuza Khan）說：「這種培育室每週可以生產 30,000 到 40,000 隻蚊子幼蟲用於 SIT 應用，未來 4 年的目標是增加培育的數量，並在半野外和野外不同條件下測試絕育後的雄蚊。」

這項聯合任務是原子能總署與世界衛生組織的新合作項目，這兩個組織於 2019 年 7 月簽署了一份諒解備忘錄，以加強使用昆蟲絕育技術來對抗傳播疾病的病媒蚊的研究與開發。

世界衛生組織專家雅達夫（Rajpal Yadav）說：「此次合作期望能提供更多有關昆蟲絕育技術可有效防制蚊子傳播人類疾病的證據。使用絕育雄蚊進行田野實驗的初步結果非常令人振奮，但我們需要更多數據來證明這個方法可降低發病率。」

瘧疾、登革熱、茲卡病、黃熱病和屈公病等經病媒蚊傳播的疾病，占全球所有傳染病死亡人數的 17 %，每年奪走 100 萬人的生命。近幾十年來，由於環境變化，過度的都市化，運輸和旅行，以及不嚴謹的病媒控制方法，登革熱的發病率因而急劇增加。

作為國際原子能總署和世界衛生組織合作的一部分，熱帶病研究特別計畫（TDR / WHO）最近呼籲公共衛生合作夥伴們，測試昆蟲絕育技術的蚊子防制，並展開流行病學評估。有 3 項多國提案主要是針對疾病的傳播媒介—埃及斑蚊和白線斑蚊，做為期兩年的實驗型計畫。

參考資料：
1. 衛生福利部疾病管制署傳染病統計資料查詢系統
2. 登革熱的燎原之火，龐中培，科學人雜誌，2018 年第 199 期 09 月號
3. IAEA Advises Bangladesh on Potential Use of Nuclear Technique to Fight Dengue Mosquitoes, IAEA, 2019/09/02



窺探藝術油畫背後的秘密(下)

文 邱賜聰

輻射具有穿透物質的特性，仿如人們的第三隻眼睛，可以用來透視油畫作品的底層，探索藝術家的繪畫創作過程、鑑定畫作的真假，並可提供訊息以供油畫保存修護之用。輻射與藝術油畫的連結，可說是輻射與生活關係中最柔軟的一塊。

前言

自1895年德國物理學家侖琴(Roentgen)發現x射線之後，輻射科技隨即蓬勃發展，其民生應用非常普遍，無論在工業、醫療、學研、農業、文化等領域，皆扮演非常重要的角色，增進人類健康及生活福祉。

輻射具有能量，當與物質發生作用時會產生特定的物理現象，利用這些物理現象可以進行科學上的檢測與分析。以x射線為例，因其具有穿透物質的特性，很快就被應用到醫學的領域，讓醫生可以看見人體內部的狀況，對醫學診斷治療有很大助益。同樣的道理，x射線也可以用來檢測藝術油畫，揭露畫作表層底下隱藏的訊息，除有助於畫作的賞析，也可了解藝術家的繪畫過程及創作思維。

上一期介紹了x射線、x射線螢光分析，本期將繼續介紹中子活化分析及放射性分析技術，應用於藝術油畫的檢測分析，並列舉說明實際案例，讓讀者瞭解輻射科技在藝術油畫領域的應用情形，對輻射與生活的連結也有更多的認識。

中子活化分析及自顯影

中子活化分析是試樣中的元素受到中子照射，捕獲中子而成為放射性同位素，然

後根據不同放射性同位素的半化期及其發出的 γ 射線能量和強度，鑑定出試樣中的元素及其含量，中子活化分析及自顯影（Autoradiography）的示意如圖 1。舉例而言，圖中的繪畫層 2（油畫的底層）顏料中若有錳 55 元素，當其捕獲中子成為放射性同位素錳 56 後，隨即放出 γ 射線及 β 粒子，γ 射線可由純鍺偵測器予以度量，β 粒子可與感光底片或影像板發生作用[1]。γ 射線可用以鑑定油畫顏料的元素，自顯影的輻射則來自錳 56 釋放出的 β 粒子，使圖 1 上方的底片乳膠感光，而呈現出錳元素在畫布上的分布影像。

油畫的顏料五顏六色，每種顏色對應不同的元素成分，因此畫作內含有各種不同的元素。油畫作品經過中子照射之後，本身會變成帶有放射性，將此油畫置於感光底片或影像板即會自動顯影成像（自顯影）。由於油畫所含的放射性元素，半化期有長有短，從幾秒鐘、幾小時、幾天、到幾個月皆有，因此每隔一段時間就可進行一次自顯影。第一次自顯影得到的影像，是來自半化期最短的放射性元素，其次是半化期稍長的元素影像，依序類推，可連續做約 10 次的自顯影，擷取畫作各不同元素的構成影像，最後再進行影像的分析判讀。

戴珍珠項鍊的女人

維梅爾（Vermeer）是荷蘭最知名的畫家之一，生平 1632-1675 年，他與林布蘭、梵谷名列荷蘭三大畫家。維梅爾的作品通常都有透明的用色，以及對光影的巧妙運用，他善於精細地描繪一個有限的空間，呈現物體本身的光影效果及人物的真實感，反映出當時社會平民的日常生活。

圖 2a「戴珍珠項鍊的女子（Girl with a pearl necklace）」是維梅爾的名作，畫

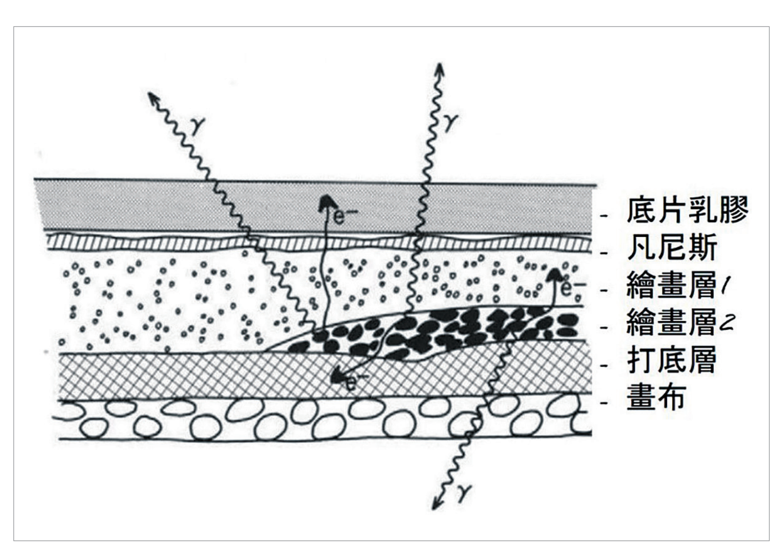


圖 1. 中子活化分析及自顯影示意圖



圖 2a. 戴珍珠項鍊的女子

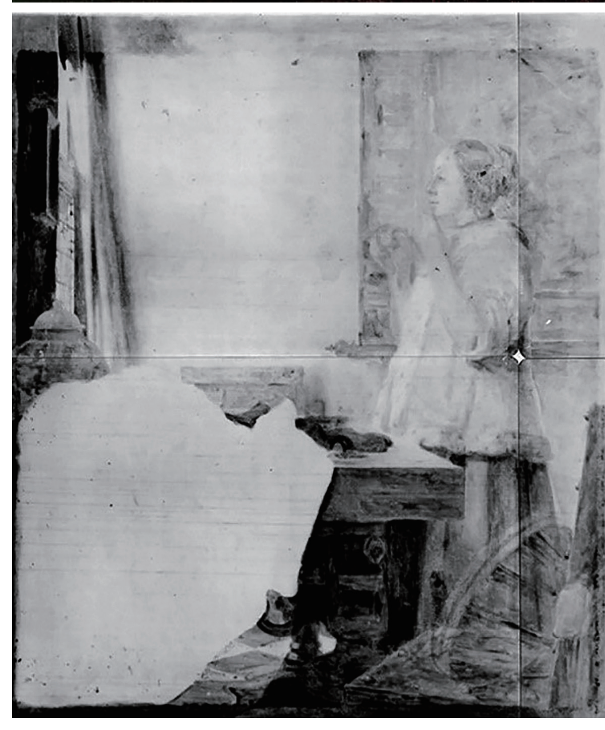


圖 2b. 中子活化分析與自顯影結果 (圖片來源 : colourlex.com)

中女子面向窗外，背景牆面單純，呈現寧靜祥和的氣氛。圖 2b 為此畫作的中子活化分析與自顯影結果 [2]，顯示畫作底層的背景牆上原有一幅地圖，右方椅子上放著一把「魯特琴」，桌子底部中央位置的瓷磚地板也隱約可見。但維梅爾後來抹去了地圖、魯特琴及瓷磚地板，簡約後的畫面可使觀者聚焦於女子身上，所謂 Less is more，藝術效果反而更好。輻射科技可使人們在觀賞畫作時，除了欣賞眼前所見藝術之美外，也可明瞭畫家的做畫過程及思維轉變，瞭解藝術作品所隱藏的真實。

放射性鉛白定年

鉛白又稱「鹼性碳酸鉛」，是白色不透明顏料，普遍應用於藝術作品，如油畫、蛋彩畫、壁畫等。鉛白是從金屬鉛提煉出來的化合物，而金屬鉛則由鉛礦石用熔煉方法提煉出來。

鉛礦石含有少量的鈾 238 元素，鈾 238 會衰變成釷 234，並持續衰變下去，最後形成穩定的鉛 206，圖 3 為鈾元素的衰變系列 [3]。衰變系列的母核種鈾 238 的半化期很長（4.5 億年），子核種包括鐳 226（半化期 1,590 年）及鉛 210（半化期 22 年）等。地球的年齡約為 45 億年，時間夠老，因此礦石內的母核種與子核種會達成平衡，亦即鉛 210 與鐳 226 單位重量、單位時間的衰變量是相同的。

金屬鉛由鉛礦石用熔煉方法提煉出來的過程中，鉛 210 會留在金屬鉛內，絕大部分的鐳 226 則會被移除，留在熔渣內。故從金屬鉛提煉的那一刻開始，鉛 210 的上游來源鐳 226 即被中斷，而鉛 210 則會持續自然衰變，每隔 22 年會減少一半的量，因此鉛白顏料的鉛、鐳放射性含量的變化，可用來推定油畫的創作年代。比方說一幅宣稱有 300 年歷史的油畫，若只是一幅 20 年的贗品，則其鉛 210 的放射性就要比鐳 226 的放射性強得多，此為放射性鉛白定年的基本原理。

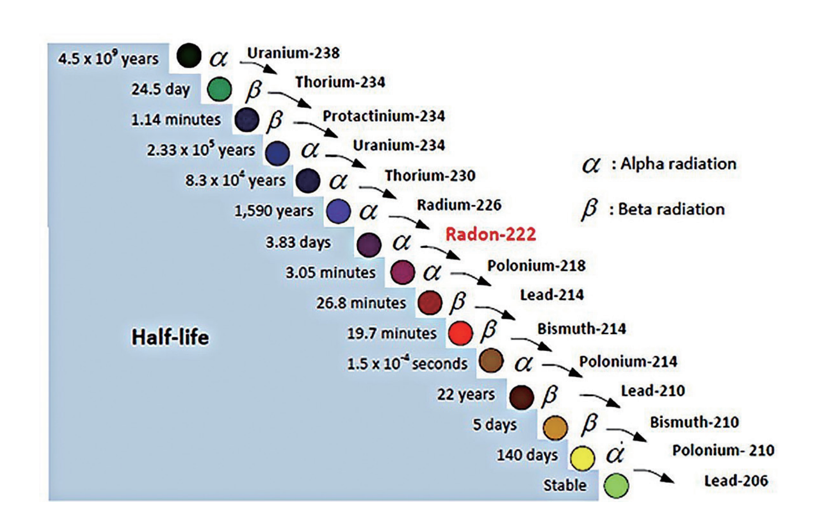


圖 3. 鈾元素衰變系列



圖 4. 在以馬忤斯的門徒

在以馬忤斯的門徒

米格倫（Van Meegeren）是荷蘭近代最具爭議性的畫家，生平 1912-1977 年，他擅長仿造維梅爾，是全世界最知名的偽畫大師。二次世界大戰期間，米格倫曾將維梅爾的畫作賣給納粹頭目戈林，二戰結束後，他被控通敵罪名入獄，米格倫為了保命，聲稱那些畫作都是他自己偽造的，不是維梅爾的真跡。為了證實所言非假，米格倫在獄中實際進行偽造維梅爾的畫作，最後他的通敵罪名被取消，改成偽造名畫罪入獄一年，米格倫也由通敵犯成為荷蘭人民的國家英雄。此樁曲折離奇的案件，曾被拍成電影「真假維梅爾（A Real Vermeer）」。

儘管米格倫自白偽造維梅爾畫作，但仍有許多人不相信他所畫的「在以馬忤斯的門徒（Disciples at Emmaus）」（圖 4）是偽造的，因為該幅作品畫得實在太好了，曾被權威的藝術鑑賞家認定為維梅爾真跡，是維梅爾最好的作品之一，也獲得「林布蘭學會（Rembrandt Society）」收購典藏。

「在以馬忤斯的門徒」畫作，是描述耶穌基督復活後，在以馬忤斯這個地方向祂的門徒現身。為釐清此畫作的真偽，專業機構以鉛白定年的方法進行鑑定分析。首先針對鈾 238 衰變系列的鐳 226 及鉛 210 元素，導引出一連串的蛻變微分方程式，考量地球上鉛礦石所含鈾 238 的濃度範圍，並假設藝術油畫的年齡為 300 年，再實際量測該幅油畫鉛 210 的蛻變率（每公克每分鐘）後，代入蛻變微分方程式後，得到下式的值 [4-5]：

$$\lambda yo = (8.5)x2^{\frac{150}{11}} - 0.8x(2^{\frac{150}{11}} - 1)$$
$$= 9.8050261204056x10^{4}$$

式中 λ 為鉛 210 的蛻變常數，yo 為製造鉛白時每公克鉛白所含鉛 210 的原子數目。研究分析的主要論點是，鉛 210 的蛻變率若偏高而使 λyo 值超過 30,000 時，就代表地球上此一鉛礦石所含鈾 238 的比率為 5.2 %，此為不合理偏高的數值，事實上不存在。「在以馬忤斯的門徒」這幅畫作的分析結果，其 λyo 值為 98,050，遠大於 30,000，故判定不是維梅爾的真跡。

對於真假難辨的藝術油畫，鑑賞家有時見仁見智難以判定。本件世紀最大的偽畫案件，利用鉛白定年方法得出科學數據後，終於塵埃落定。

核彈尖峰定年

來自太空的宇宙射線與地球大氣層的氮原子作用，在天然環境中不斷形成放射性同位素碳 14，而被所有生物體吸收，碳 14 在生物體內的含量會形成平衡狀態。當生物體死亡時，就會停止吸收碳 14，體內原有的碳 14 會慢慢衰變減少，每隔 5,730 年（碳 14 的半化期） 就會減少一半。因此只要測量出生物有機體內的碳 14 含量，就能推定其大致年齡，此即「碳 14 定年法」。由於古老的藝術油畫頂多只有幾百年歷史，碳 14 的半化期則長達 5,730 年，

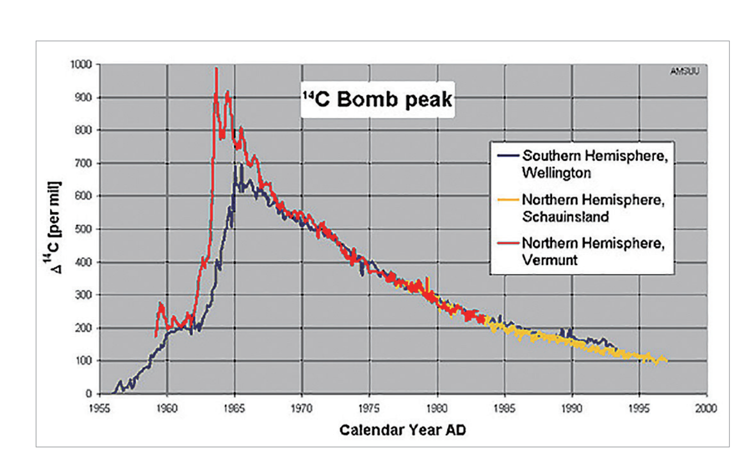
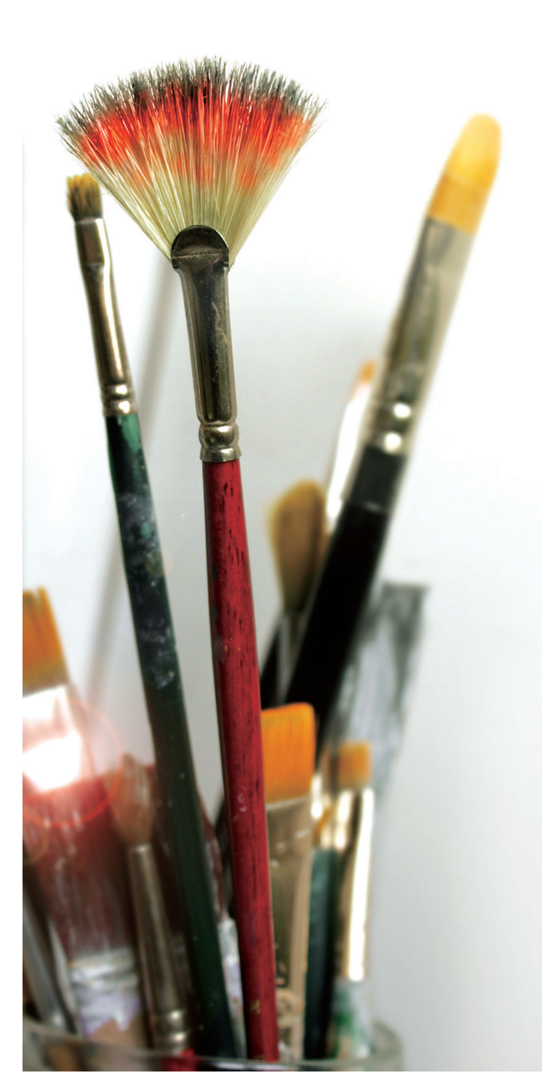


圖 5. 碳 14 核彈尖峰



若直接應用「碳 14 定年法」推定畫作年齡，不準度可能偏高。

碳 14 核彈尖峰定年的原理則稍有不同，雖然也是分析畫作材料的碳 14 含量，卻是與核彈爆炸所產生的碳 14 含量進行比對。

原子彈爆炸會釋放出大量中子，中子再與氮原子作用產生碳 14，而使大氣層中的碳 14 含量快速上升。從 1950 到 1963 年全面停止大氣層核試爆期間，對流層中的碳 14 大約增加了一倍，形成一個明顯的核彈尖峰（Bomb Peak），如圖 5。全球大氣裡的碳 14 從 1955 年開始顯著上升，在 1963 年達到最高峰，然後生物圈開始慢慢吸收碳 14，大氣裡的碳 14 含量隨之下降 [6]。

大氣層中的碳 14 含量增加後，地球上所有活的有機體吸收的碳 14，也會隨之增加，動物及植物均是如此，包括用來製作油畫畫布的棉和麻。因此利用碳 14 核彈尖峰曲線，可以推論藝術油畫的創作年代，鑑定油畫的真假。

形式的對比

費爾南·雷捷（Fernand Léger）是法國知名畫家及雕塑家，生平 1881–1955 年，是機械美學藝術大師，他於 1913 年至 1914 年繪製「形式的對比（Contraste de Forms）」系列作品。美國紐約的索羅門古根漢基金會及義大利威尼斯的佩姬古根漢美術館，分別收藏了「形式的對比」畫作，圖 6 左上的畫作為佩姬古根漢美術館收藏，圖 6 右上的畫作為索羅門古根漢基金會收藏。由於國際藝術市場的偽畫日漸增加，自 20 世紀 70 年代開始，藝術界懷疑佩姬古根漢美術館所收藏的那幅「形式的對比」畫作，可能不是畫家雷捷的真跡。

為確認傳言是否屬實，義大利的核物理專家們從該幅畫作背後的褶襉地方，取下一塊幾毫米大小的畫布原料（圖 6 左下），利用加速器質譜儀（AMS）精確度量碳 14，得到畫布原料的碳 14 濃度為 129.05 ± 0.68 pMC[7]，pMC 是「當

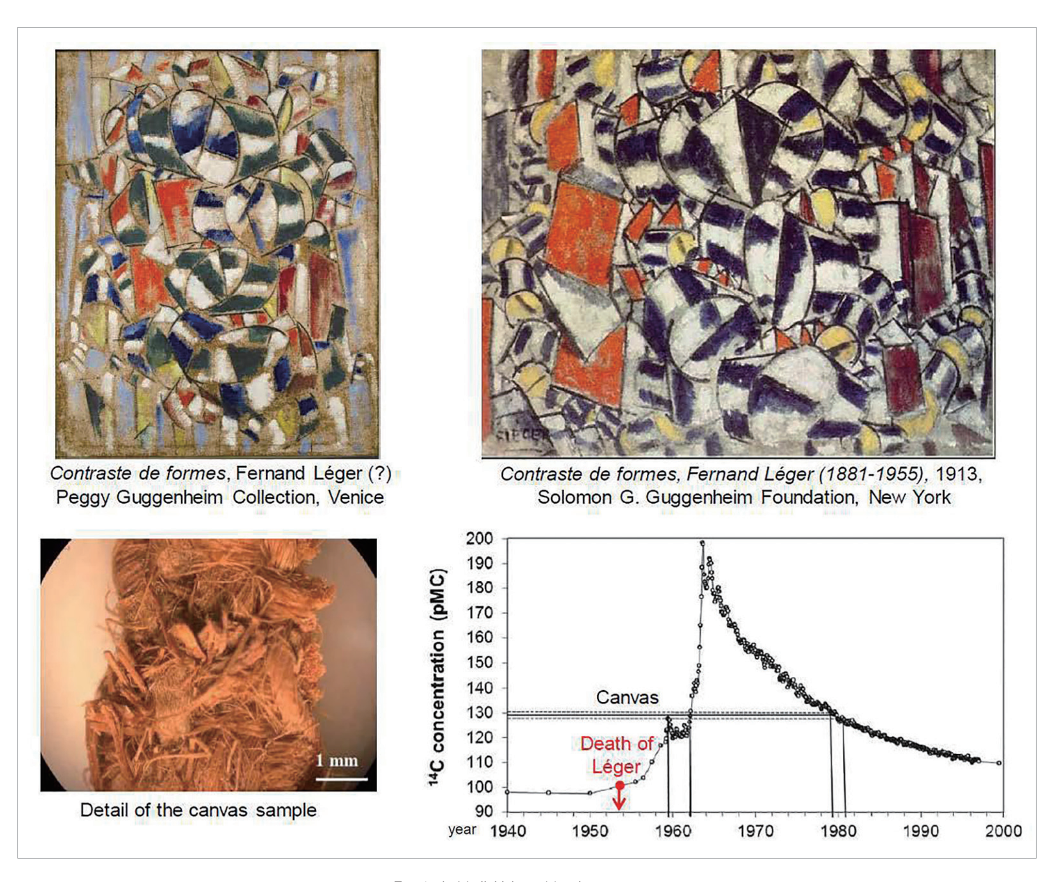


圖 6.「形式的對比」的碳 14 分析結果

代碳含量百分比」的簡稱，是以 1950 年碳含量為基準，129.05pMC 的意思就是 1950 年碳含量的 1.29 倍，由圖 6 右下所示的核彈尖峰圖，畫布原料碳 14 濃度 129 pMC 所對應的年代為 1959 年、1962 年、1979-1980 年。碳 14 核彈尖峰的比對結果，推定畫布是在 1959 年後才製成的，而雷捷在 1955 年就去世了，因此判定佩姬古根漢美術館收藏的是假畫。沒想到核武試爆造成大氣層碳 14 含量增加的現家，可用來鑑定藝術油畫的真假，也可用到其他領域（如刑事鑑定）的科學鑑定，顯示輻射在民生應用上的獨特與多元性。

結語

輻射在文化遺產領域的應用非常普遍，也受到許多國家及國際機構的重視，國際原子能總署除了出版專業報告及舉辦研討會，並推動國際合作研究計畫，協助相關國家開展文物研究工作。國內利用輻射進行藝術油畫的檢測分析，已有相當經驗及技術能力，相關設施及儀器設備也尚稱齊

全，例如：清華大學的水池式研究用反應爐，可用來做中子活化分析及自發顯影研究；科技部的臺灣光子源設施及中研院的加速器，可用來做加速器 x 射線螢光分析；臺灣大學地質科學系加速器質譜碳 14 定年實驗室，可用來做放射性定年分析；奇美博物館及臺灣美術館等的大面積微區掃描 x 射線螢光分析儀，可用來做油畫的掃描及元素分析；公民營機構的 x 光機、x 射線螢光分析儀、x 射線繞射分析儀等，都可用來做油畫的檢測分析。

輻射應用於藝術油畫的研究分析，屬於原子能科學研究的項目之一，也是輻射與生活中最柔軟的一個區塊。目前科技部與行政院原子能委員會共同進行的「原子能科技學術合作研究計畫」，其研究領域及主題內已列入「中子活化分析及中子照相於藝術油畫之鑑定分析」，然而至今尚無研究機構對此提出研究計畫書。無可諱言，美術館或藝術油畫的持有人，對中子活化分析應用於其收藏品或許仍存有一些顧慮，這方面仍有待加強溝通。期望有朝一日在輻射專業及藝術專業人員合作下，能夠早日開展此方面的研究，以增進國內輻射在文化遺產領域的研究應用水準。

（本文作者為原子能委員會前副主任委員）

參考資料：
[1] C. Laurenze-Landsberg, "Neutron-Autoradiography of Two Paintings by Jan Vermeer in the Gemäldegalerie Berlin", W. Lefèvre, Inside the Camera Obscura – Optics and Art under the Spell of the Projected Image, Reprint 333, Berlin 2007, S. 211-225.
[2]"Autoradiography of Oil Paintings at the Berlin Experimental Reactor", C.O. Fischer etc., Neutron Radiography Proceedings of the Second World Conference , Paris , France, June 16-20,1986.
[3] https://hchem2017.blogspot.com/2017/05/nuclear-chemistry-radon-gas-in-homes.html?m=0
[4] Martin Braun ,"The Meegeren Art Forgeries" , Differential Equation Models, pp 71-80.
[5] http://abesenyei.web.elte.hu/mattanar/15o/diffegy15o/vanmeegeren.pdf
[6] http://web.science.uu.nl/AMS/Radiocarbon.htm
[7] L. Caforio, etc. Discovering forgeries of modern art by the 14C Bomb Peak, Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 6



日本後端營運的公眾溝通

文 **編輯室**

日本在 2000 年 6 月初時通過了《特定放射性廢棄物最終處置法》(簡稱《最終處置法》，必須為用過核燃料再處理過程所產生的「高放射性廢棄物」以及「TRU 放射性廢棄物」建立一座深層地質處置設施，以及設立最終處置資金確保機制。由於有法源依據，日本經濟產業省在同年 10 月時成立專責法人「日本原子力環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO）」，負責推動處置設施的相關工作，以及原子力環境整備促進資金管理中心（Radioactive Waste Management Funding and Research Center, RWMC）負責核能後端基金的營運與管理。

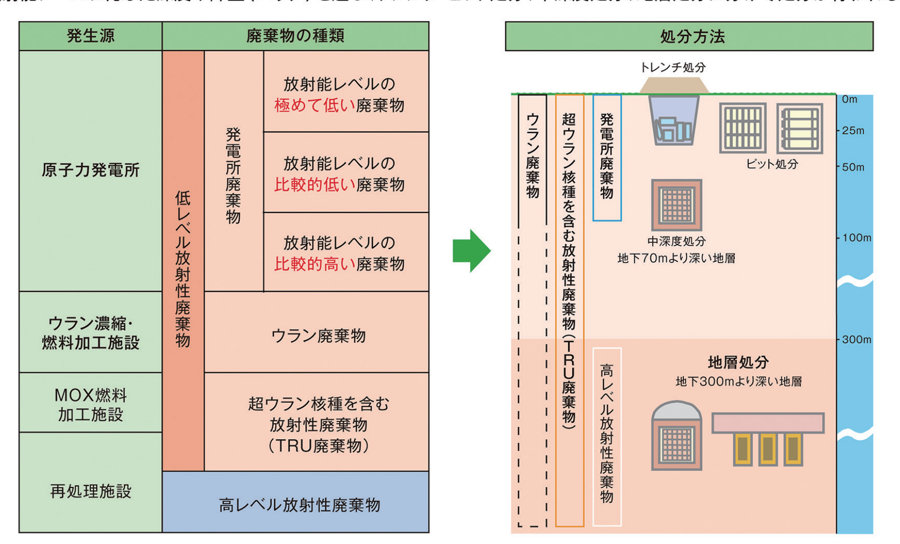
除了為最終處置設立專責機構，日本《最終處置法》也確立了三階段的選址調查程序來進行最終處置場場址的調查。三階段的調查程序，以調查範圍大到小，分別為第一階段的文獻調查、第二階段的概要調查，以及第三階段的精密調查。文獻調查是以該地區過去的文獻資料為主，如是否有活斷層與火山活動的紀錄等，來進行第一階段的評估，排除不適當的地區；概要調查是利用鑽孔取樣的方式，評估該地區地質、地下水的特性與狀態；精密調

查則是在該地點開挖地下試驗通道，進行更詳細的調查，確保該處地質足夠穩定、安全的情況下，才可開始最終處置場的建設工程，整個選址調查過程估計需要 20 年的時間。NUMO 在完成每階段的調查後都會公布當次的調查結果，指出下個階段將著重調查的區域，並詢問各市政當局的意見，若提出申請地區市政當局反對，即使該地點在技術上可建立處置設施，調查作業仍無法進入下一個階段。

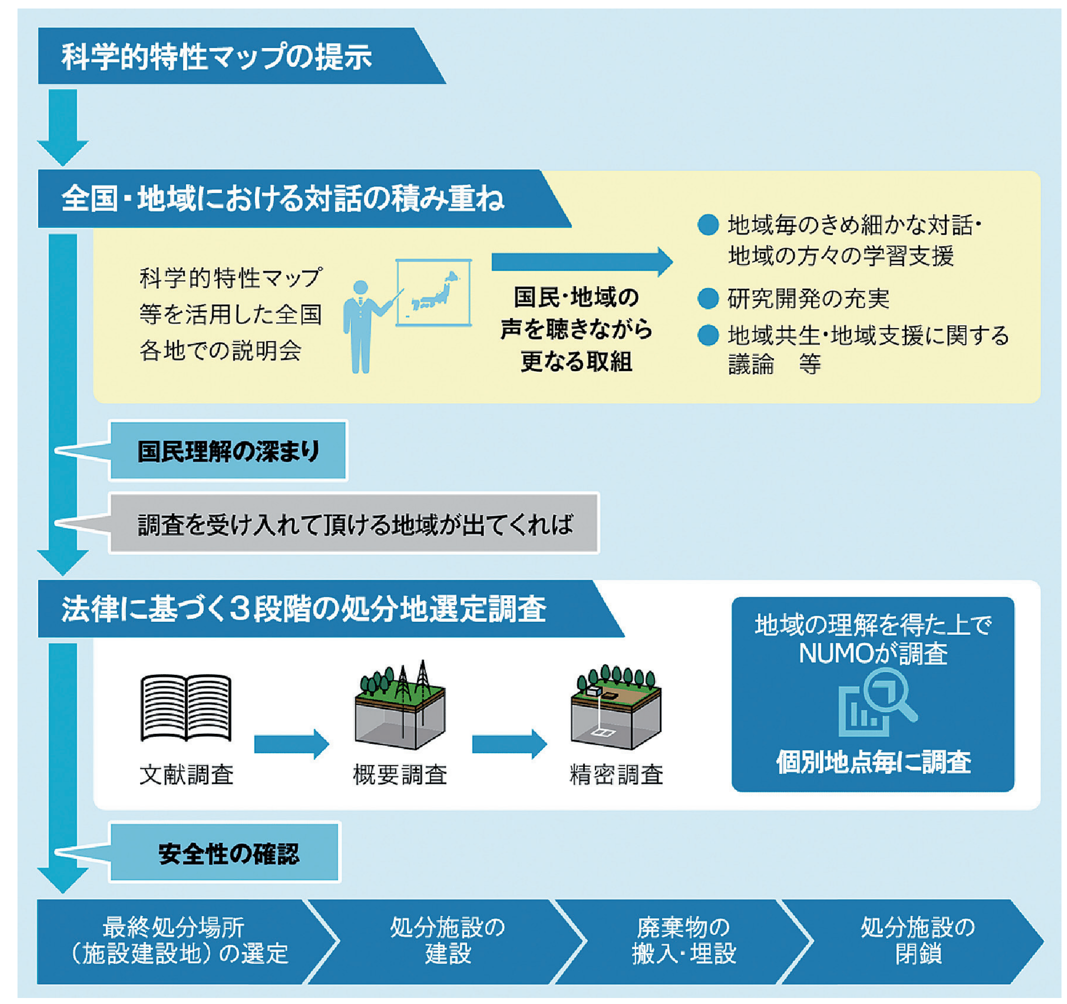
過去公眾溝通不落實得到的教訓

在開始建設、營運處置設施前，最重要的工作非選址莫屬，該於何處建設處置設施、又該如何與當地的民眾溝通，讓民眾願意自願於當地設立處置設施，著實是一字難題。NUMO 自 2002 年底時即開始公開徵求自願接受於當地進行場址調查的地區，當時僅有位於日本四國高知縣的東洋町在 2007 年初向 NUMO 提出正式申請，但在該處居民對在周遭進行調查的利弊反應兩極且僵持不下，該申請案也在同年 4 月的町長選舉輪替後撤回，至今 NUMO 仍未收到任何自願場址的申請，也無法開始選址三階段的第一階段之文獻調查，2011 年的福島事故也導致選址作業更為艱難。

由於選址陷入膠著，為確保有效推動最終處置計畫以及取得民眾共識，日本政府在 2013 年底時成立相關之部長級委員會與工作小組，對選址作業重新進行審查與改善，經多次研議後在 2015 年時宣布



日本放射性廢棄物分類與處置方式，TRU 廢棄物與高放射性廢棄物必須在地下 300 公尺處進行深層地質處置（圖片來源：日本電氣事業聯合會、日本原子力文化財團）



日本經修正後於處置場選址三階段調查程序前新增了「與全國各地國民進行對話」項目，期望能透過加深國民對最終處置的理解，找尋自願設置處置設施的地區，再開始選址流程 (圖片來源：NUMO)

修訂後的最終處置基本方針，修改的重點除了重申開發最終處置場為「本世代」的責任之外，也強調日本必須促進全體國民對最終處置的理解，國家（即日本政府）需要帶頭領導最終處置的發展，密切地向各地區政府提供相關訊息並進行對話，也須給予自願接受處置設施的地區相對的福利，國民應對自願接受處置設施的地區居民懷抱敬意與感謝等，開始加強雙向溝通。

先有「對話」才有「選址」

最終處置場選址三階段調查程序也在 2015 年公布修正基本方針後稍微做出了修正，在開始選址第一階段文獻調查前先讓政府進行全國科學特性審查，以地圖的方式呈現科學條件合適的地點，並在各地召開相關說明會，主旨在與各地民眾「建立對話」，也希望有地方政府在了解最終處

置後自願提出作為候選場址的申請。若有地質合適的地區，日本政府也需要主動向其建言，促請該地區市政當局一同合作，這也是基本方針在修改後所新增的內容。

這份「地圖」在多位專家學者耗時約 2 年，就候選場址必須具備的條件融合相關學會的情報與意見，來制定基準，並在 2016 年的夏天邀請經濟合作暨發展組織核能署（OECD/NEA）進行同儕審查（peer review），確保整個過程與所要求的基準均符合國際標準，隨後完成這份「科學特性地圖」的編制，2017 年 7 月由日本經濟產業省公布。

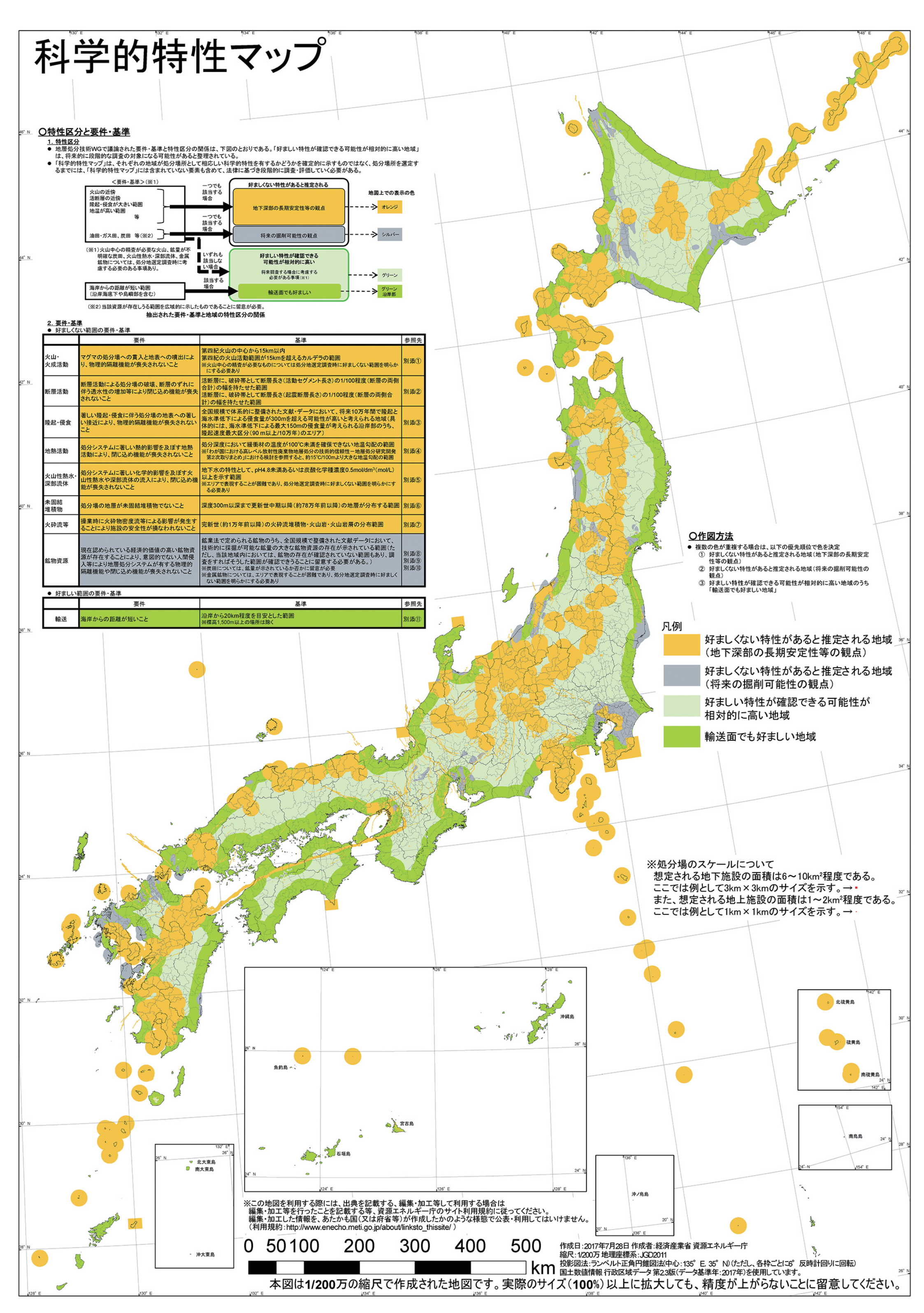
科學特性地圖

由於處置設施將建於深地層中，必須考慮到大量的地質、水文等條件，以及潛在人為無法控制的因素，像是位於火山、活斷層附近，以及地層有隆起、侵蝕，或是地層軟弱等的地區就不符合地質條件，地下有礦物資源等的地區由於未來有可能進行開採，也列入地質不適合的地區。而每項因素 NUMO 都訂有基準數值，如在火山半徑 15 公尺內都屬於位在火山周圍，地下水酸鹼值若小於 ph 4.8 就屬於酸度過高等，利用準確的數值來定義超過多少範圍即屬於地質不合適之地區。

除了區分地質合適與不合適的地區，由於日本現有的玻璃固化體均暫時存放在青森縣六所村的高放射性廢棄物貯存管理中心，未來主要將使用海運的方式將這些高放射性廢棄物運送至最終處置設施，配合短程的陸路運輸，因此還要考慮到運輸工具在一天之內可以移動的時間與距離、運輸途中受到恐怖攻擊等因素，陸路運輸的距離越短越好，因此近沿岸 20 公里為最為理想之地區。

總和上述地質與運輸的條件，日本利用 4 種不同的顏色來呈現科學特性地圖，只要符合任何 1 項地質不適合的條件均以橘色標示，約占全地圖 30% 的面積；未來有可能進行挖掘開採的地區則以銀色標示，占全地圖約 5% 的面積，兩者均不適合當作處置設施的場址。若沒有符合橘色與銀色等條件，屬於「比較合適」的地區則使用綠色標示，占全地圖超過 60% 的面積，而這其中又再分成兩類，分別為靠近沿岸的深綠色以及內陸的淺綠色。

NUMO 對此也作出解釋，這些綠色的地區雖然屬於地質條件「比較合適」的地點，但仍要經過選址三階段程序詳細的鑽孔、開挖等評估，才可確定這些地區是否適合建立處置設施，因此只能說這些區域「有希望」，不是只要是綠色的區域就可在這些地方建立處置設施。NUMO 強調，公布科學特性地圖是為了配合在各地召開的說明會，讓全日本國民可藉由這份地圖來了解地質處置，以「在備有科學特性的情況下秉持客觀、公正的立場，即使是不同的讀者來看都可以得出一樣的結論」為目標，找尋可自願接納處置設施的地區。公布科學特性地圖僅是整個最終處置計畫的開始，NUMO 期望能開啟更多、更長遠的討論與對話。



科學特性地圖(圖片來源:日本經濟產業省)

規模逐漸擴大的公眾溝通

自 2015 年 5 月公布最終處置修改方針起，NUMO 就已開始於日本各地分區進行意見交換會與研討會，表達了「面對面溝通」的重要性， 主題除了與最終處置有關的議題（如介紹最終處置、該如何進行、選擇地質處置的原因與必要性、最終處置方針修正的背景與內容等）之外，還有公布科學特性地圖的目的、公布地圖後對話活動的推動、核能在國家能源配比中的定位、核燃料循環政策等的議題。

2017 年 7 月在經濟產業省公布科學特性地圖後，NUMO 即以介紹此地圖為主軸，於 10 月開始在全日本各地召開意見交換會，2018 年 5 月進而以科學特性地圖中標示綠色的地區為主，開始更大規模的「有關科學特性地圖 • 對話型說明會」，加深國民對科學特性地圖、高放射性廢棄物最終處置與流程的理解。說明會的參考資料內容概要如下：

1. 高放射性廢棄物最終處置的流程：

- 日本高放射性廢棄物的來源、數量與處置流程；
- 日本現有核燃料循環相關建設；
- 放射性物質在經由玻璃固化後的放射線劑量與放射性衰變時間；
- 日本放射性廢棄物的分類與處置方法。

2. 關於深層處置：

a. 基本概念：

- 日本地質處置的概念與選擇地質處置的原因；
- 地下 300 公尺深處地質特徵；
- 國際間大多採用地質處置與各國處置設施的建設現況；
- 多重障壁的構造，其中的「人工障壁」有：將放射性物質固定於其中的玻璃固化體、外圍的金屬容器、黏土類的緩衝材質，「天然障壁」則是指最外層包覆處置設施的岩盤；
- 地質處置事業的營運流程、各階段營運的地上示意圖與地下透視圖。

b. 選址三階段調查

- 進行地質處置期間需要考慮到的地質環境，如火山與斷層活動、地表侵蝕與隆起、岩盤的性質、地下的溫度、地下水移動的速度與水質等；
- 基於法律的選址三階段調查，分別為文獻調查、概要調查與精密調查，調查的範圍依順序逐漸縮小；
- 選址三階段調查程序中在完成各階段的調查均會公布調查結果，但只要各自願場址的縣市長、村町長在程序中表達反對繼續調查，程序將立即終止。自願的場址也必須完成整個選址流程，才可能進入到設施建設的階段。

c. 風險與確保安全：

- 確保地質處置安全、具體的方式；
- 板塊、火山與斷層活動伴隨的風險與因應方式；
- 地震與海嘯的影響；
- 不合適地質環境特性伴隨的風險的因應方式；
- 假想放射性物質遭外釋（安全性確認）；

- 地下水的年代測定；
- 處置設施營運期間地上設施的作業流程與安全對策；
- 運輸時的安全性（海上與陸上）；
- 相關技術報告內容與連結；
- 處置設施封閉前、後的安全性評估；
- 處置設施設計工學技術介紹與其他補充參考資料。

3. 關於科學特性地圖：

- 科學特性地圖介紹；
- 最終處置耕耘至今的歷史；
- 範圍涉及全日本的說明會的進行；
- 各種科學特性的考量與地圖編製要件基準一覽；
- 今後處置設施場址選址的流程；
- 科學特性地圖的定位與公布後的行動；
- 社會科學的觀點（從社區角度來看待）；
- 地域支援。

4. 關於今後的對話：

- 原子力發電環境整備機構（NUMO）業務介紹；
- 在各地進行的對話活動與國內外技術交流活動；
- 支援能源教育；
- 科學特性地圖公布後的對話活動；
- NUMO 地域共生的理念；
- 建立起處置設施地方自治體與 NUMO（包含政府）間「對話」的橋樑；
- 國際間各國對處置設施當地進行溝通與地域共生的實例。

除了將以處置設施的安全為最大優先，NUMO 也強調「地域共生」及「與社會相互信賴」的重要性。由於最終處置場是一項需要長時間營運的設施，NUMO 相信只有支持該地區的發展，處置設施才可穩定運轉，發展的內容包括協助道路與港灣的整修與擴建、地下研究所與技術訓練中心的維護、加強當地醫療、交通與通訊設備，使該地區更適合居住，也會支援當地經濟的發展，增加就業機會等。另外，NUMO 也做出承諾，將在處置設施工程開始前將總辦公室遷至當地，成為該社區的一員，一同為社區的發展作出貢獻。

「有關科學特性地圖•對話型說明會」的講義內容以大量的圖片輔助簡易的文字，免去過多文字與數字導致民眾無法有效吸收，即使在不需要口頭說明的情況下仍可獲得足夠的資訊。說明會舉行的日期、地點也都公布在 NUMO 的網頁，自 2018 年 5 月開始預計至 10 月底，在日本各地舉辦超過 80 場的說明會，一週約 2-4 場的頻率，除了介紹地質處置之外還有最重要的問答時間，參加者可事先提出問題，當天出席的專家學者也會依序進行回覆。不同場的說明會還備有小組討論或處置場虛擬實境（VR）體驗，讓出席者可以更進一步的瞭解最終處置。說明會在結束後 NUMO 也都會將會議當天的開會結果（含問答內容）陸續上傳到 NUMO 的網頁上，讓有興趣參加但無法出席的民眾也可稍微理解當天會議進行的情形，前 3 個月內舉辦的說明會甚至還可全程觀看影片。





左：NUMO 的「地質•未來」全日本巡迴宣導車
右：NUMO 就科學特性地圖在全日本召開大規模的說明會
（圖片來源：NUMO）

其他溝通管道

除了召開各種說明會與研討會之外，NUMO 也非常注重與下一代的對話，為此設立一系列的活動來進行宣導，其中的「地質・未來（Geo Miari）巡迴宣導車」即是 NUMO 大力推動的一項，在這台移動大卡車裡面除了有介紹最終處置的小型展覽之外，還可觀看 3D 影片、進行手做黏土（處置容器外圍的緩衝材質）小實驗、透過虛擬實境體驗未來處置場內的視野等，宣導車中也會配有專業人員進行解說與互動，希望能讓所有年齡層的參觀者從不同的角度來理解地質處置。「地質・未來巡迴宣導車」主要停靠的地點主要為科學博物館、營業用設施與公園，至今已跑遍全日本，範圍橫跨北海道、本島、四國及九州，未來也將隨著對話型說明會一同繼續進行。

另外，NUMO 的技術專家與職員也開始到日本各地的學校與教師團體進行拜訪，透過視聽器材與小型實物操作，講述地質處置與能源環境問題。NUMO 也與教師團體合作，一同開發了給中、小學用的「高放射性廢棄物」教學教材，用簡單的文字與圖片介紹核能發電廠與家庭、超市、工廠、火力發電廠相同，都會產生廢棄物，但核能電廠所產生的廢棄物因為帶有放射性，必須運送至地下 300 公尺深的地方才可安全進行貯存等。NUMO 也編製了教師用的指導教材，為課程提供更完整的資訊與教學計畫，並於每年 3 月舉辦專門的研討會，供有興趣、需要的老師進行意見交換與分享。

除了中小學，NUMO 也為大學生開設地質處置相關的辯論課程，課程內容除了會有 NUMO 的職員與專業人員主持、介

紹地質處置之外，還會進行關於輻射與放射性廢棄物地表貯存的簡報、辯論比賽與相關設施參訪等。

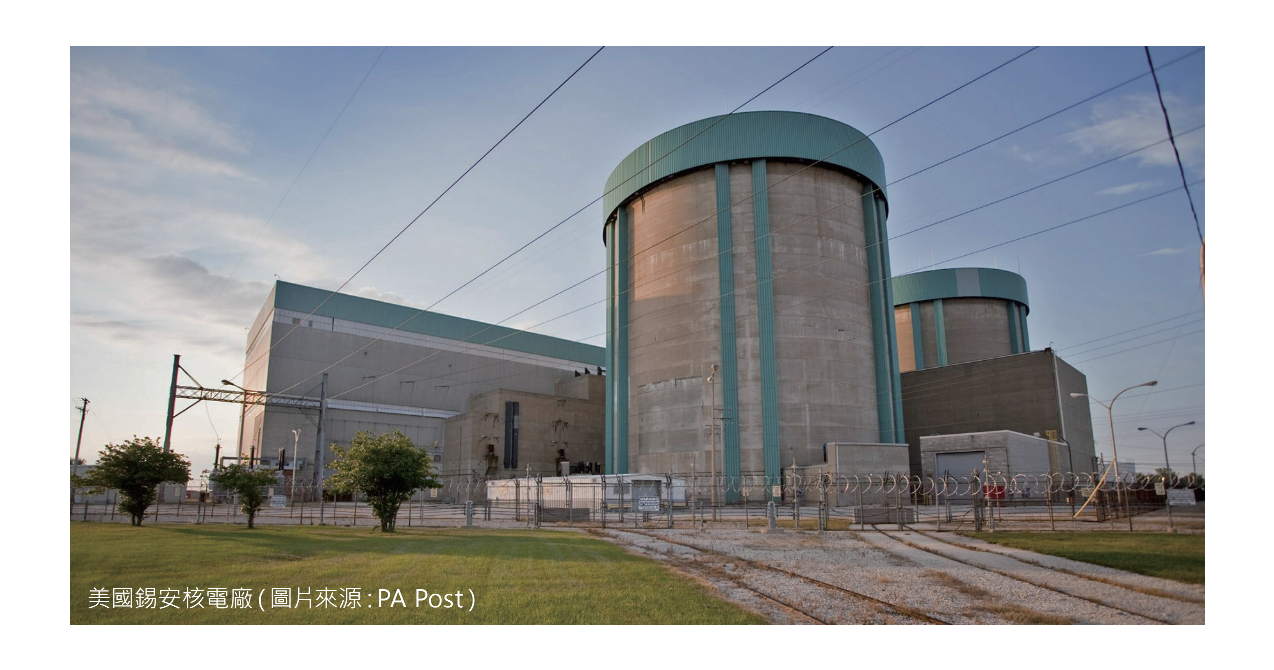
位在北海道北部的幌延地下實驗室（URL）即是相關參訪設施之一，該實驗室的建設工程自 2000 年開始，將分成三個階段開挖至地下 500 公尺處，目前開挖深度約在地下 350 公尺，日本主要為了進行地質處置技術的研發與驗證，以及促進民眾對地質處置的瞭解因而興建，由日本國家原子力研究開發機構（JAEA）所負責營運。因此，除了可親自走進地下實驗室進行參觀之外，為了增進公眾溝通，JAEA 也在該處地表設立「夢的地創館」，進行科普教育，也會定時舉辦學生科學夏令營、公眾資訊教室與年度研究成果發表會等，日本另外一座位於中部岐阜縣的瑞浪地下實驗室也是相同的用途。

由於近幾年社交軟體相當盛行，NUMO 也透過 YouTube、Facebook、Instagram 等社交軟體推廣地質處置，除了上傳地質處置相關的影片，還有轉發與說明會、溝通活動等相關的貼文，期望能更貼近民眾生活，讓更多的民眾可以接觸到這個議題。

結語

日本在過去體驗到溝通失敗導致最終處置無法順利進行的情況下，替選址的程序做出了調整，並強調必須「先有對話才有選址」，NUMO 也因此先把選址擺一邊，開始利用多項管道，讓日本國民理解最終處置以及其必要性，需先藉由有效的溝通建立起雙方的對話與信賴關係，才有機會徵求到自願接受設置處置場的地區，進而開始三階段的選址調查程序，為高放射性廢棄物找到永久的處置地點，盡到本世代的責任。

參考資料：
1. 日本原子力環境整備機構，対話型全国説明会 説明参考資料，https://www.numo.or.jp/taiwa/pdf/map_2018.pdf
2. 日本原子力環境整備機構，PR ライブラリー，https://www.numo.or.jp/pr-info/pr/
3. 日本原子力環境整備機構，エネルギー教育支援サイト，https://numo-eess.jp/
4. 日本經濟產業省，放射性廃棄物について，https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/
5. 日本經濟產業省，科学的特性マップ公表用サイト，https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/
6. 日本電氣事業聯合會，最終処分の取り組み，https://www.fepc.or.jp/nuclear/haikibutsu/high_level/torikumi/index.html
7. 財團法人核能資訊中心《核能簡訊 172 期》


美國錫安核電廠(圖片來源:PA Post)

美國核電廠除役實錄

文 **編輯室**

根據我國原子能委員會今（2019）年 8 月統計，全世界有 23 座核電廠已獲准終止電力公司對電廠所有權的執照，其中 16 座位於美國，這為美國核能產業提供獨特的機會，學習、發展出實際執行除役的成功經驗。通常核電廠規劃除役的時程約 20–30 年，但美國錫安（Zion）核電廠僅僅花費 9 年時間，就將廠區復原成綠地，比原訂時間表整整提早 13 年，節省 70%的預算。該廠寶貴的經驗足以提供我國參考。

早期美國核電廠進行除役時，核工業界在這方面的經驗很少，經過至少 30 年不斷研發、應用大量的經驗與教訓後，累積出合適的實踐方法，包括成功的技術、計畫、資源管理、廢棄物管理、管制機構與利害關係人的管理等。這些成功與失敗的經驗代價高昂，但是提供了現今美國成功執行除役與除污計畫的基本指導原則。

然而，經驗是無可替代的。沒有經驗，就必須經歷美國核工業界承受過的學習歷程，花費相同的成本。核電廠除役需要一個經驗豐富的管理團隊，協助開發、管理成本與時程、處理不斷出現的問題、提供新的商品和服務供應鏈、重新調整勞動力等，不過，首要任務是確保安全和遵守相關法規。此外，在面對管制機構和利害關



美國錫安核電廠除役 (圖片來源 : EnergySolutions 公司提供)

係人不斷調整的要求與期望下，還能執行上述這些任務。在網際網路上搜尋、閱讀如何除役一座核電廠的相關資訊，或許可以看到其他人的成功案例，以及他們使用的工具與設備，但卻無法獲得做到這一切的技能，電廠自己若無法執行就需要請專業人員來執行。

與核電廠的興建、運轉相比，除役需要不同的技術、經驗與組織型態。美國已經開發出新的商業模式，將除役責任轉移到具有專業技術、組織文化與經驗的公司，具有成本效益、安全且合乎規範的除役作業在美國已被證實可行。藉由這種方法，EnergySolutions 公司以不到 10 億美元的經費完成錫安核電廠兩座 108.5 萬瓩壓水式反應爐的拆除與廠址復原作業，並且在短短 9 年內達成，比電廠的預計時程提前 13 年，節省 70% 的預算。現在錫安電廠廠址即將成為綠地，未來可無限制使用。EnergySolutions 公司主導的其他除役案例如下：

- 美國 La Crosse 核電廠，5 萬瓩沸水式反應爐。
- 英國 18 座鋁鎂鈹（MAGNOX）反應爐（2008-2014 年）。
- 美國 Big Rock Point 核電廠，6.7 萬瓩沸水式反應爐。

EnergySolutions 公司參與協助其他主要部分的案例：

- 美國 Rancho Seco 核電廠，91.3 萬瓩沸水式反應爐（反應爐建築物內部鋼筋混凝土拆除、清理與處理廢棄物）。
- 日本福島第一核電廠（除污與除役諮詢

服務、污水處理系統的配置與操作）。

- 日本敦賀核電廠 1 號機，35.7 萬瓩沸水式反應爐（與日本原子力發電公司進行經驗交流、協助日本最早 BWR 的拆除與除役最佳化）。

在過去的 5 年中，EnergySolutions 公司與日本原子力發電公司合作，確認了美國經驗可以轉移到日本。根據各階段除役的需求，EnergySolutions 公司提供了美國重要的經驗與教訓：

規劃與技術考量

除役初期階段面臨到的問題：

- 工作人員心態的調整—需要從發電業務轉變為除役 / 廢棄物管理。
- 開發除役階段的新廠商。
- 採用最適合的除役方法與技術。
- 尋求放射性廢棄物的處理方案。
- 規劃不同用途的輻射安全防護措施。
- 理解、配合管制機構和利害關係人的要求與期望，並研擬出因應方案。
- 在還沒有高放射性廢棄物處置設施的情況下，移除用過核燃料並進行貯存。
- 在有限的資金範圍內進行除役工作。

放射性廢棄物處理

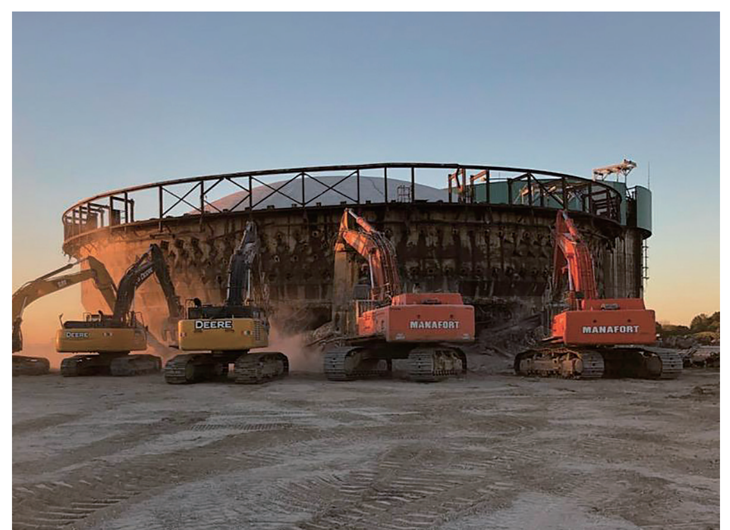
核電廠的除役會產生大量的放射性廢棄物，美國早期的廢棄物處理費用非常昂貴，且處理設施的容量極其有限，因此需要開發許多減容技術，將廢棄物數量最小化。這些技術不僅減少了需要處理的廢棄物容量，甚至可以完全消除掉廢棄物。美國 EnergySolutions 公司開發並應用全方位的廢棄物處理能力，包括：

- 機械除污：砂礫 / 磨料噴砂，研磨，噴射爆破，表面處理等。
- 切割和重新包裝，以減少體積。
- 壓實、切碎、焚燒、重新分類。
- 金屬熔化 / 回收。
- 污水處理
- 化學除污
- 電鍍
- 蒸汽改良
- 玻璃固化
- 設備再利用
- 運輸包裝
- 實驗室的支援

許多廢棄物最小化技術可以技術移轉，可降低廠內儲存空間的需求，等到國家級廢棄物處置設施完工運轉後，除役計畫即可受益。

針對除役作業產生的放射性廢棄物，必須制訂明確的接收標準，這是任何成功的除役團隊都會學到的重要課題。基本上，除役計畫就是放射性廢棄物管理的執行計畫，所有放射性廢棄物的產生方式與處理作業，都必須與最終處置的做法一致；如果不是，材料會被不必要地切割、處理和包裝，以後很可能需要重新處理和包裝。電力公司希望推動除役計畫是可以理解的，但重要的是這些計畫與最終的放射性廢棄物處置方式應完全一致。

美國學到的重要經驗，就是必須制訂有




美國錫安核電廠拆除作業 (圖片來源 : EnergySolutions 公司提供)





利於除役目的的放射性廢棄物接收標準，才不會對人或環境增加風險。運轉期間的放射性廢棄物數量，通常不需要特別具有成本效益的處置方案。然而，即使將放射性廢棄物有效的減容至最小化，除役仍會產生大量的放射性廢棄物。在美國，這些放射性廢棄物數量及其管理占除役總成本的 50％以上。因此，放射性廢棄物產生者、管制機構和處置設施運轉者之間，共同合作建立符合除役需求的新接收標準，是非常有效益的做法。

拆除／除污技術

許多核工業界人士著迷於採用新穎的技術，並盡可能地利用遠端遙控和自動化技術。然而，EnergySolutions 公司從經驗中學到了避免使用未經證實的創新方法和技術，因為這樣做會增加整體計畫的風險，提高成本且延遲進度，通常也會增加工作人員的輻射曝露劑量，他們採用的方法是盡可能使用簡單且成熟的切割技術。

該公司建議盡量減少使用機器人，因為完全由機器人操控的作業，往往需要經常維護並且不太可靠。若需要遠端切割的操作，應由經過培訓且經驗豐富的工作人員控制。該公司使用機械切割法進行水下反應爐內部的拆解，而不是會產生碎片、影響水質、降低能見度的氣體切割法。對於不需要水下切割的系統、結構或組件（SSC），則運用火焰切割或鑽石線鋸切割等方法，以減小元件的尺寸，成效已經獲得證明，而不是使用極為耗時的手持鋸子／工具。

用過核燃料貯存

在美國，由於還沒有國家級用過核燃料最終處置場，也缺乏再處理的能力，因此必須開發用過核燃料於電廠內貯存，稱為「獨立用過燃料貯存設施（ISFSI）」。從反應爐安全容器廠房中移除高放射性物質，是核電廠除役初期的關鍵工作，也是改變電廠風險等級的重要步驟，可立即降低執行作業的複雜性和成本。

除役計畫管理與掌控

除役計畫的管理仰賴於經驗豐富的計畫經理人，他們運用經過驗證的系統與工具來指導、管理、執行、監管、控制、報告和回應整個除役作業，並滿足設定的除役目標。經驗豐富的除役承包商會不斷評估、改進管理流程，以使每個除污與除役計畫更有效益。

藉由共同的「工作分解結構（Work Breakdown Structure, WBS）」開發出詳細的計畫基準範圍、進度與成本估算，WBS 會定義所有的工作項目以及所需資源和方法，包括工作人力、設備、材料與物品、分包合約、差旅與生活費用等。

透過組織、溝通和分配除役「工作包（Work Packages）」的過程，建立有效且定義明確的工作控制程序，這將有助於執行除役作業。工作包是定義需完成的工作、先決條件、方法與具體的說明，以便現場工作人員知道該做什麼，如何有效且安全的完成工作，要開發的工作包應與規劃階段所制訂的 WBS 一致。在調動大量除役工作人員到現場之前，規劃團隊應該先開發出足夠數量的工作包，以確保工作人員到了現場不需耗時等待，可使他們的時間與生產力得到優化。

上述這些都是真實且必要的，許多人會說這是成功管理核電廠除役計畫所需的全部。但是，除役作業與傳統、可預測的作業之間有重大的差異，除役作業的風險更大，傳統型的作業側重於作業範圍、成本和進度，但在不可預測的計畫中，風險是



美國錫安核電廠 ISFSI 設施（圖片來源：EnergySolutions 公司網站）



除役計畫管理中的風險管理(圖片來源:EnergySolutions 公司)

計畫管理模型中的主要組成部分。就其性質而言，這些計畫是藉著有限的產業經驗所發展而成的基礎，且受到更多不確定性和不可預測性的影響。

該公司已開發出一種方法和管理在這種高風險環境中除役作業所必需的工具，此方法已成功在錫安核電廠得到證明（見上圖）。

遵守管制法規

在除役期間，遵守所有地方、州和國家法規，放射性廢棄物清除以及電廠和放射性物質的保護都很重要，沒有一項可以妥協，唯一可以討論的是如何遵守規定。在許多情況下，如何遵守法規可能會和法規的內容相混淆。美國管制法規的許多框架都是為運轉核電機組而建立的，但是，除役的要求和涵蓋事故 (bounding accident) 條件與運轉中的要求和條件有很大不同。因此，遵守法規的方式應隨著朝向除役的轉變而調整。舉一個簡單的例子，放射性廢棄物從包裝在桶中，然後放在更大的容器中，最後成為不包裝、完整的大型組件，都能符合管制法規的要求。

關鍵的一步是調整與管制機構的關係，管制機構也在學習如何因應從運轉到除役的改變，他們必須調整放射性廢棄物的分級方法，這只有透過電力公司和管制機構之間一定程度的合作才能適度地執行。

然而，我國的電力公司與管制機構面臨了下列問題：

1. 放射性廢棄物處置設施的選址、許可和運轉，以及處理除役期間產生的大量放射性廢棄物的監管系統尚未完全建立。對最終處置設施和管制限制，包括對所有放射性廢棄物（L1，L2 和 L3 廢棄物）的

含量與廢棄物接收標準，仍有不確定性。

2. 管制機構可能還不確定如何針對工作人員從核電廠正常運轉到除役作業之間，在思維模式上的轉換進行監督和檢查。

3. 除役任務的規定與要求水平，應該符合新任務的風險概況而有所不同。

與利害關係人的關係

與利害關係人之間的關係是否良好，對除役計畫的成功至關重要，不和諧的關係將導致除役計畫出現重大困難，可能會造成成本上升和進度下滑。和利害關係人進行溝通，首先需要確定因為放射性廢棄物中期貯存、處理和最終處置而受到影響的組織和團體有哪些，還必須處理核電廠從運轉到除役狀態的改變，為地區所帶來的影響。

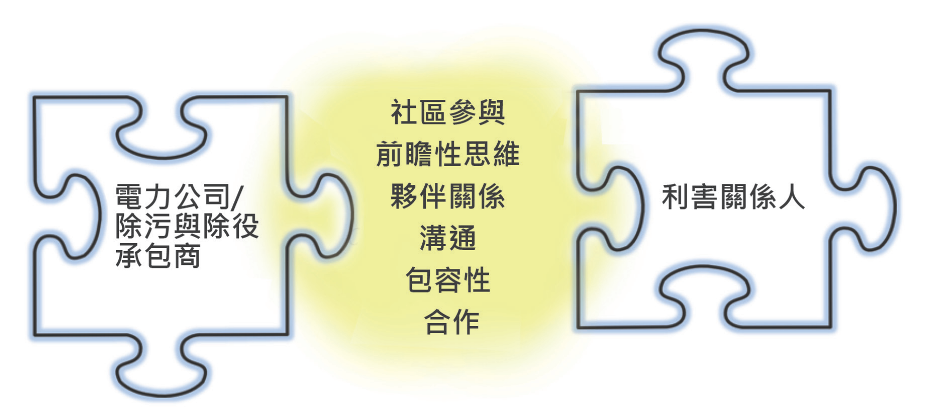
與利害關係人和社區接觸的目標是：

- 展現對該地區被影響的同理心，並協助他們度過除役這段過渡期。
- 與社區和利害關係人建立良性關係。
- 保持公眾的信心。
- 及時回應利害關係人的需求，並提供準確的資訊。
- 盡量減少阻止或延遲計畫進度且增加成本的爭議。
- 保護除役團隊的聲譽。
- 隨時瞭解與除役計畫有關的潛在公共事務議題或問題。

在美國，許多電力公司和除役承包商已經瞭解到，建立一個由當地公民、地方政府官員、意見領袖、社會運動者和環保組織代表所組成的「社區諮詢小組（CAPs）」，可以有效地接收各種想法，並幫助業者瞭



運送放射性廢棄物貯存容器 (圖片來源 : EnergySolutions 公司網站)



與利害關係人溝通的屬性(圖片來源:EnergySolutions 公司)

解和解決計畫期間出現的問題。

在 Zion、La Crosse 和 SONGS 這 3 座核電廠除役與除污計畫期間，EnergySolutions 公司與電力公司合作設立社區諮詢小組，協助設立主題、議程、會議頻率，提供適當的管理人員與技術面議題專家 (Subject Matter Experts, SMEs) 人選，以確保能獲得民眾和管制機構的回饋。會議通常每季舉行一次，除非有計畫變更或出現更有趣的主題領域，就會較頻繁地舉行。EnergySolutions 公司在初期就會和附近城鎮的工會、地方官員，針對預期的活動、對社區的影響、當地分包商和工會人員在除役計畫上潛在的工作機會，以及其他問題先進行溝通。在除役計畫中，需提供足夠的資訊，以便及時獲得所需的當地許可。該公司確認了除役對當地野生動物（包括瀕危物種）的影響，並以負責任的方式保護或遷移任何受影響的物種。此外，為關鍵的公眾人物安排電廠參訪之旅，提供計畫執行的第一手資料。

上圖顯示了電力公司 / 除污與除役承包商與其利害關係人之間，有效溝通和參與方法的屬性。

最終，這種高參與度和透明度的溝通，對電力公司、供應商 / 承包商、民眾與管制機構都有利，對除役和放射性廢棄物的目標達成共識，獲得了彼此的信任，而提高計畫和決策的效率。

寶貴的經驗

憑藉 30 多年的商用核電廠除役和放射性廢棄物管理經驗，EnergySolutions 公司整合許多核工業、管制機構（例如美國核能管制委員會），及自己的經驗教訓，應用於當前和未來的除役計畫。這些經驗與教訓牽涉的層面廣泛，並非單一的經驗就可確保除役工作會成功，而是必須將過去 100 多個獨立的經驗與教訓整合在一起。

根據除役的現狀，EnergySolutions 提供一些重要的短期經驗教訓：

1. 從運轉到除役過渡期的管理至關重要。
2. 除役是一個獨立且複雜的「廢棄物管理計畫」。
   - 運轉結束時的狀態與條件，和放射性廢棄物處理，會促進規畫和執行。
   - 資金必須是充足且可預測的。
3. 移除用過核燃料後，相關的管制要求即顯著降低，所以應盡早清除用過核燃料。
4. 緩解風險和簡化基線 (baseline)，可提高成功的可能性。
   - 研發和創新技術常增加計畫風險（成本）。
   - 廠區 / 設施的特性代表主要風險和機會。
5. 經驗豐富、知識淵博的管理者的監督和參與至關重要。
6. 強有力的計畫管理、計畫控制和任務規劃 / 追踪必不可少。
   - 除污與除役計畫與興建計畫不同，沒有經驗手冊可供參考。
   - 必須包括管理不確定性的能力。
7. 對於除污與除役，需要與運轉不同的管制機構和法規。
   - 以風險為考量的分級方法。
   - 不要將法規與為遵守法規而採用的要求混淆。
8. 電力公司 / 承包商「角色和責任」劃分。
9. 除污與除役計畫管理必須對計畫決策負起責任。
10. 利害關係人的參與。
    - 盡早並且經常做開放誠實的溝通。
    - 不應有「驚喜」。

結語

30 年前美國核能工業界已經學到的除役經驗和教訓，台灣可以站在巨人的肩榜上，參考採用而從中獲益，避免重複學習這些艱難又昂貴的工作，縮短摸索的過程，使我國核電廠除役能在安全、準時的前提下順利完成。



美國錫安核電廠除役完成，廠址即將成為綠地，可無限制使用。（圖片來源：EnergySolutions 公司提供）

參考資料：
1. https://www.aec.gov.tw/ 焦點專區 / 核電廠除役 / 常見問題 -218_2550_2554.html
2. EnergySolutions 公司網站
   https://www.energysolutions.com/decommissioning-decontamination/
3. AESJ article input – DRAFT/10-30-18

2050 年達成 碳中和的關鍵因素

譯 朱鐵吉

國際能源署 (IEA) 於 2019 年 5 月底發表「清潔能源系統與核能發電」報告書，指出：「今後先進國家若不再延長運轉現有的核電機組，和新建核電廠，核能整體設備容量將於 2040 年減少 1/3，二氧化碳排放則會大量增加，2050 年要達成『碳中和 (Carbon neutral)』，也就是二氧化碳排放量和大自然的吸收量達到平衡，是不可能的事情。」

先進國家重要能源開發趨向停滯

2018 年全世界的總發電量，核能占比 10％，其中先進國家占比為 18%，低碳能源亦占重要的貢獻。但是近年來特別是歐、美和日本等先進國家已有的核能機組因老舊而廢止，新建的計畫又停滯不前，其結果電力部門轉換利用清潔能源 (再生能源與核能) 的步調趨緩。雖然太陽光、風力等再生能源大量增加建設，但因核能占比減少，即使清潔能源發電量在 2018 年占 36%，仍然跟 20 年前的水準一樣。

因應氣候變遷不可或缺的能源

國際能源署這份報告書強調：「要轉換利用清潔能源，核能及低碳能源技術均不可或缺。這種能源在電力上的貢獻很重要，清潔能源占比越大時，會大幅減少二氧化碳的釋出，因此發電部門在電力輸送、空調等電化設備，推動低碳能源是非常必要的。再生能源和核能對碳捕獲與封存 (CCS) 也具有重要的貢獻。

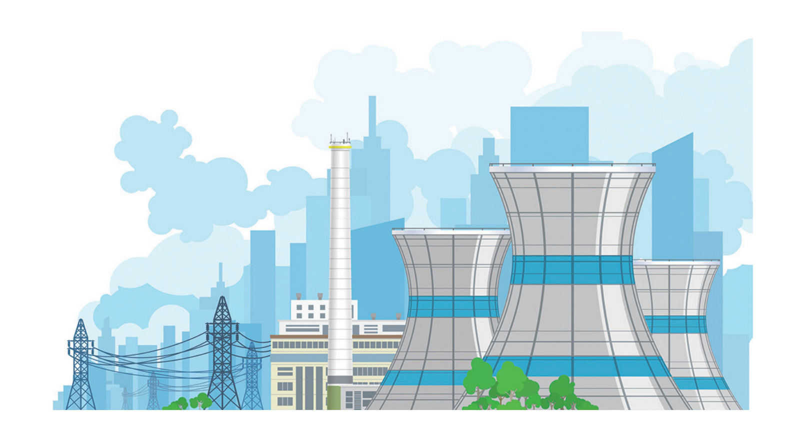
但是，國際能源署「可永續開發情境」的目標—本世紀後半全球溫度上升在攝氏 2 度以下，盡可能抑制在 1.5 度以下，是巴黎協議的基本目標，要達成的話，清潔能源要增加到現在的 3 倍，表示從現在的 36% 到 2040 年需增加為 85%。

因此，在 2040 年來臨前，節省能源，增加可再生能源，以及核能發電需比現在增加 80%。核能最重要的優勢是能穩定供給電源，太陽能和風力是一種自然變動型的可再生能源，若再生能源增加時，其他電源必須具有非常彈性的運轉能力，此時核能在一定範圍內具有相當大的貢獻。

延長運轉的經濟效益問題

國際能源署的報告書指出，運轉中以及延長運轉的核電廠有幾項因素需考慮：「反應爐原先設計的運轉壽命為 40 年，

32



全世界的平均運轉年數為 35 年，歐洲是 35 年，美國是 39 年，到 2050 年時先進國家中有 1/4 的機組達到除役年限，其他的國家在未來數年內如何決定非常重要。美國已允許 90 部機組延長運轉至 60 年，然而延長運轉在經濟上也面臨到一些問題。相較於新設立太陽能風力發電，延長核電機組運轉或新建機組，需要較長的時間和更多的經費，核能的價值是在於能穩定供給電力，但是電價須反映付出的高額的建造經費，資金的調配較為困難。」

新建計畫—巨額資金的危機

「延長運轉現有的機組雖可以暫時補足清潔能源的需求，但是新建機組還是不可缺少。新建機組的初期投資金額非常巨大，開始建設後至商業運轉的時間也很長，特別是電力市場自由化的國家，會遭受其他電源的競爭。芬蘭、法國和美國建設第三代反應爐，當初打算要大量的增加建設，但是投資者意願並不高。」

核能的負面影響

國際能源署報告書指出：「先進國家若沒有新建的話，即使已有的反應爐延長運轉，核能也會慢慢凋謝 (Nuclear fade case)。到 2040 年會發生下列狀況：(1) 先進國家的核能設備容量比現在減少 1/3，(2) 二氧化碳排放量增加 40 億噸，(3) 開發核能替代能源的再生能源系統，總計需要追加 1.6 兆美元的成本，(4) 電價必然上漲。

對先進國家的建議

為避免這種事態發生，國際能源署對先進國家的核能發電提出建議：

一、核能發電的維持：現有的核電機組在確保安全下延長運轉。

二、電力市場調整能力的評估：適當的評估電力市場的需求，提供必要的服務系統和穩定的供給。

三、市場價值以外的價值評估：核能在環境以及能源安全的貢獻價值，與其他低碳能源相比的差異，必須做適當的評估。

四、安全法規的更新：必要時提升為更進步的安全法規。

五、投資環境的創立：核能計畫的風險在

於長期投資的資金考量，關於現有的反應爐和新建者，其計畫包括資金的調配，以及如何加強風險的管理。

六、新建核電廠的資源：在審核的程序上，計畫的安全設計若沒有問題，應盡可能不要延遲計畫的實施而增加成本。

七、改良新型反應爐設計的資源：小型模組式反應爐 (SMR) 其成本低、工期短，可以促進反應爐的開發。小型模組式反應爐對風力及太陽能等再生能源的支援，比大型反應爐更有彈性。

八、人才的維持：核能的工程技術人才與管理人才的維持和培育相當重要。

各種投資的做法

國際能源署報告書概要的介紹核能的重要性，在建議書中關於運轉中的反應爐對先進國家非常重要，「核能在市場價值以外的價值評估」其中有關環境方面的貢獻，提到美國有一個州，因核能的貢獻使得二氧化碳達到零排放。另一方面，關於新建設的核電廠，「創造有吸引力的投資環境」是最重要的，報告書指出：(1) 土耳其和英國設立長期購買價格保證公司的資金，(2) 英國政府提供債務保證，(3) 匈牙利、捷克、波蘭和法國以國有企業直接投資，美國的法規是以州的資產為基礎參與核能投資。

上述是國際能源署報告書建議各國今後應採取的行動。國際能源署對核能發表特別報告書已有 20 年，對先進國家核能現今的狀況表現出憂慮的態度，期望各國能對能源需求和環境衝擊的問題有更密切的關注。

資料來源：
東海邦博，"IEA：2050 の CO2 排出ゼロには原子力不可欠", Energy Reviews, Aug.2019: Vol.39, No.8, P.61-61.



日本福島第二核電廠將除役

譯 **編輯室**

福島第一核電廠核子事故自 2011 年至今已過 8 年，日本東京電力公司（TEPCO）在今（2019）年 7 月 31 日正式宣布福島第二核電廠 4 部機組將全部除役，代表福島縣內所有的核電機組都將邁入歷史。福島第二核電廠位在福島第一核電廠南方約 11 公里處，廠內有 4 部沸水式反應爐，在 1982 年至 1987 年間陸續開始商轉。與福島第一核電廠不同，雖然福島第二核電廠的 4 部機組也在 2011 年經歷了東日本大地震與海嘯，但這 4 部機組均沒有受損，事故發生時 4 部機組全都緊急停機，事故後也都進入安全、穩定的冷停機狀態（Cold shutdown）。

東京電力公司表示，「全數除役的這項決定是在徹底檢視福島第一與第二核電廠於各項層面可能帶來的影響後所做出，包括確保必要的人力資源，以及兩座電廠安全除役對本公司的影響等，我們也有將當地居民希望除役這兩座電廠的意願納入考量」。東電也補充，未來將向當地居民就該電廠的除役計畫與工作進行講解，期望能讓當地居民對除役的內容達到全面瞭解的程度，也會繼續努力以維護兩座電廠周圍民眾的福祉。

根據東電的除役計畫大綱，除役一座核電廠通常需要耗時 30 年才可完成，但由於福島第一核電廠也將同時進行除役工作，必須完善考慮人力資源的分配，因此東電估計要完成福島第二核電廠所有機組的除役工作，約需要超過 40 年的時間。東電未來將會盡快把所有儲存在第二核電廠的用過核燃料自機組內移出，燃料的數量總共有約 1 萬束，目前東電正在規劃於廠內設立一座乾式貯存設施，讓燃料的轉移工程可以有系統性的進行。另外，東電也向在地的企業提供參與除役工程的機會，如採購物料與設備等，通過這種方式為該地區做出另外的貢獻。

而東電另外一座位於新潟縣的柏崎刈羽核電廠，其 6、7 號機組雖然已在 2017 年底通過重啟審查，但新潟縣柏崎市市長櫻井雅浩在 2017 年 6 月時要求東電必須除役 1-5 號機組中至少 1 部的反應爐為前提，才同意其 6、7 號機組的重啟申請。東電也於最近向櫻井市長提出該電廠重啟運轉與除役的計畫大綱，東電表示等到他們可以確保非化石能源能夠成為足夠的電力來源時，預計在 6、7 號機重啟後 5 年內將可能除役 1 部以上的機組。對此柏崎市政府將與議員與居民進行討論，再決定是否接受東電提交的計畫。

資料來源：

1. World Nuclear News. “Tepco declares Fukushima Daini for decommissioning.” July 31, 2019.
2. World Nuclear News. “Tepco says it may scrap Kashiwazaki-Kariwa units.” August 27, 2019.

日本6成用過核燃料將使用金屬護箱進行乾式貯存

譯 編輯室

根據日本共同社最近的研究顯示，日本約15,200噸的用過核燃料中約有60%以上將採取金屬製護箱的方式進行中期貯存，目前這些燃料大多仍存放在各電廠內的用過核燃料儲存池內，但這些儲存池都將在短時間內達到滿載的狀態。日本各電力公司都寄望能藉由乾式貯存設施，提高因核電廠持續發電所產生的用過核燃料儲存容量。一項對日本電力公司乾貯計畫的調查結果，也透露了各電力公司預計建立的乾貯設施容量。

日本電力公司認為使用密封的護箱貯存用過核燃料比放置在燃料池中貯存還要安全，但是，與儲存在燃料池中相比，乾式貯存雖然不需要依賴水循環與電力來替用過核燃料進行冷卻，它仍只是一個暫時的解決方法。有分析師指出，日本在2011年福島事故後，由於面臨到技術上的困難與揮之不去的安全問題，尚未能按原計畫將用過核燃料進行再處理，在電廠附近的居民也擔心乾貯設施的使用將延長這些放射性物質在當地的貯存時間。

日本持有核電機組的10家電力公司擁有總計25,500噸的用過核燃料儲存容量，其中有60%目前已經儲滿，若將未使用的核燃料列入計算則將占用近70%的容量。因此，這些電力公司計畫新增總和10,000噸的乾貯設施儲存容量，其中東京電力公司已決定在存有1,650噸用過核燃料的福島第二核電廠內新建一座乾貯設施，在福井縣擁有11部核電機組的關西電力公司也期望能在2030年前找到一座可貯存該公司約2,000噸用過核燃料的地方。

基於安全考量，管制機構日本原子力規制委員會（NRA）也鼓勵電力公司將用過核燃料自燃料池中轉移至乾貯設施進行貯存。在2011年由地震與海嘯所引發的福島事故中，位於反應爐廠房內的用過核燃料池失去了冷卻功能，使大量的用過核燃料面臨到過熱與曝露至空氣中的風險。但是，同樣位於福島第一核電廠內的乾貯設施則維持了安全貯存的狀態，即使該設施同樣也被海嘯淹沒，外圍的護箱與內部的用過核燃料都沒有受到任何損壞。

資料來源：

The Japan Times. “60% of spent nuclear fuel in Japan to be stored in metal casks in the future, research shows.” August 15, 2019.

英國需要更多樣化的**能源組合**

譯 **編輯室**

英國在今（2019）年 8 月 9 日晚間尖峰時段發生了近幾年最大規模的停電事件，時間長達 1 個小時，近 100 萬戶的企業、民宅受到影響，範圍橫跨英格蘭與威爾斯，倫敦多條鐵路、機場快線也因此癱瘓，數個最繁忙的車站甚至必須關閉。英國能源管制機構天然氣暨電力市場管制局（Ofgem）要求英國電網系統營運廠商國家電網公司調查這起事故，初步的調查報告顯示，當時供電系統因為位於貝德福德郡的 Little Barford 天然氣發電廠以及英國北海的 Hornsea 離岸風力發電廠在數分鐘內相繼發生故障、脫離電網，電網因此供電不足導致這次的停電。雖然停電的時間持續不到 1 個小時，但各種衍生出來的狀況則持續至深夜。

英國的商務能源及產業發展大臣（Business secretary）李德森（Andrea Leadsom）對此表示，「國家電網已證實，這次的停電與風力發電的不穩定性無關。政府大量投資這項潔淨能源是期望能在 2050 年時達到零碳排放，但這次的停電意外確實證明了我們需要多樣化的能源組成。」

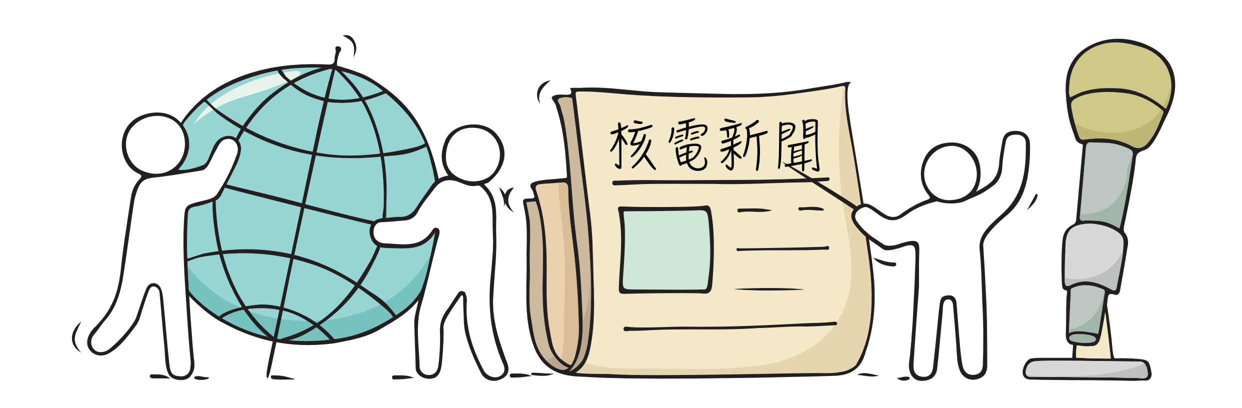
根據 7 月份發布的統計數據，2018 年英國低碳能源首度生產超過國家一半以上的電力，再生能源與核能發電占了總發電量的 53%，燃煤發電的比例則下降了 1/4，降至歷史最低水平的 5%。雖然英國政府逐步淘汰煤炭的政策明確，但 2018 年天然氣仍是最大的單一發電來源，占了 39%。零碳排的核電則供應了英國近 1/5 的電力，但現有的核電機組都將在 2030 年前退休，辛克利角 C（Hinkley Point C）為目前唯一在建的新核電廠。

英國在今年 6 月 21 日成為全球前幾大經濟體中首個將「零碳排放」立法的國家，期望能在 2050 年時停止對氣候變遷帶來的負面貢獻。



資料來源：

World Nuclear News. "UK blackout proved need for diverse energy mix, says business secretary." August 14, 2019.



國外新聞

加拿大成功研發出用過核燃料貯存容器塗層

加拿大放射性廢棄物管理機構(NWMO)在最近公開一種由 NWMO 自行研發與製造的系統，透過電鍍的方式將用過核燃料儲存容器與銅包覆在一起，形成塗層，這項技術未來將用於加拿大用過核燃料深層地質處置計畫當中。

總部位於加拿大安大略省奧克維爾(Oakville)的 NWMO 表示，銅可防止鋼製的儲存容器遭到腐蝕，將用過核燃料的儲存容器浸泡在以銅為基底的電鍍溶液槽中，約 10 天後就會形成 4-5 毫米厚的銅電鍍層。儘管電鍍技術已存在了至少 100 年的時間，但這種技術過去都用於製造銅硬幣上，用來製造厚的電鍍層還是首次。這項創新也可能讓 NWMO 有機會加強與日本、瑞士與英國等其他國家用過核燃料體制間資訊的交流。

NWMO 也指出，外圍有銅塗層的用過核燃料儲存容器屬 NWMO「多重障壁系統」中的一部分，用來確保用過核燃料在深層地質處置場中的安全，這項技術將有助於加拿大進行「安全、長期的用過核燃料管理」計畫。NWMO 是在 2002 年時根據加拿大《用過核燃料廢棄物法(Nuclear Fuel Waste Act)》，由加拿大持有核電廠的電力公司所成立，致力於發展用過核燃料長期管理與研發相關設備。

World Nuclear News, 08/21/2019

美國能源部全力投入開發新型的核能技術

美國能源部(US Department of Energy)副部長布魯耶特(Dan Brouillette)在最近公開的一份聲明稿中表示：「能源部正全力投入開發進步型核能技術(Advanced Technologies)」，強調「目前已經有超過 50 家的美國公司正在開發能讓核能更有效、廉價的進步型技術，期望未來能讓美國掌控全球的市場，因為這將為美國帶來更多的工作機會、更低的碳排放，以及更強壯的經濟。」

布魯耶特接著概述了現任政府為支持進步型反應爐的發展，在 2 年內所完成的 11 項實質性工作，其中包含了美國在今（2019）年 6 月指派具備相關核能背景的 Rita Baranwal 擔任能源部核能辦公室主任，這相當於能源部副部長的職位；沃格特勒（Vogtle）核電廠 3、4 號機組的建設工程；美國首座小型模組式反應爐（SMR）已確定將在美國愛達荷國家實驗室（Idaho National Laboratory）建立，預計於 2026 年開始運轉；將建立國家反應爐創新中心，以加速進步型反應爐的執照發放與商業運轉過程；能源部在過去 2 年內已投入 1.7 億美元的資金加速進步型核能技術的發展；2018 年發起的「全球美好未來（NICE Future）倡議」，這項計畫由美、加、日等國家一同帶頭，旨在確保核能在潔淨能源的議題討論中能獲得適當的發聲權，並推廣進步型核能技術在國際間的合作，目前已聚集超過 35 個國家與 80 個組織的專家學者。布魯耶特在文末也重申：「從這些例子可看到美國政府對發展民用核能的承諾，也證明了美國有能力擴大能源生產，確保國家能源獨立，並為國民創造更多的工作機會。」

U.S. Department of Energy, 08/28/2019

歐洲因天氣過於炎熱降低多座核電廠發電量

連續幾個月侵襲歐洲的熱浪除了帶來創下歷史新高的氣溫之外還加上了乾旱，導致河水水溫過高、流動緩慢等因素限制了河水冷卻反應爐的能力，今（2019）年 7 月底法國國營輸電網路公司（RTE）的數據顯示，法國核能發電量因此減少了 8%（520 萬瓩）。負責法國 58 部核電機組營運的法國電力公司（EDF）表示，因為隆河（The Rhone）的水溫過高，將陸續抑制附近 3 座核電廠的發電量，位於加倫河（Garonne）的另外 2 座核電廠也因為相同的理由，暫停向國家電網供電。

法國電力公司在利用河水作為反應爐冷卻劑方面受到國家法律約束，必須保護當地動植物的生態，核電廠在面臨到天氣炎熱引起水溫升高或水位、流速較低時，就需要降載發電，即減少發電量。法國核能發電占國家電力需求約 75%，與一週前相比，可使用的核電量下降了 1.4 個百分點。

德國意昂集團（E.ON）的核電子公司 PreussenElektra 也由於格隆德（Grohnde）核電廠旁邊的河水溫度過高，將暫時關閉該座核電廠數天。PreussenElektra 公司在德國還有營運另外兩座核電廠 Bavaria 與 Brokdorf，前者目前正處於停機維修的狀態，後者則運轉中，但兩座核電廠預計都將因為天氣因素暫停工程與運轉。

Reuters, 07/25/2019

澳大利亞國會探討解除核電禁令

澳洲能源部長泰勒（Angus Taylor）在今（2019）年 8 月初要求澳大利亞聯邦議會就該國使用核能啟動調查程序，這是澳洲 10 多年來首次對核能進行調查，調查內容將考慮到核能發電對經濟、環境與安全帶來的影響。泰勒特別要求議會調查「未來政府有可能考慮使用核能發電的情況與需要的條件，包含小型模組式反應爐在內的技術」。調查範圍將涉及廢棄物管理、

運輸與儲存；健康與安全、環境影響、能源負擔能力與可靠性、經濟的可能性、社區參與、勞動力、安全影響、國民共識，以及任何其他可能有關的議題。這項調查需在今年底完成，且提交報告至能源部。

澳洲礦業協會（Minerals Council of Australia）會長吉本斯（Patrick Gibbons）表示，澳洲擁有全球最多的鈾礦資源，也是世界上第三大金屬生產國，但澳洲政府卻禁止發展核能發電，鈾礦的探勘與開採也受到限制。但從民意調查的結果顯示，現在越來越多民眾認識到核能與氣候變遷之間的關聯，「聯合國政府間氣候變遷委員會（IPCC）與國際能源署（IEA）都說了同樣的話，若要將全球氣溫上升控制在攝氏 1.2-2 度內，我們需要如核能之類的潔淨能源，而且是需要『很多』」。「此外，生產澳洲 70% 電力的燃煤發電機組平均機齡已達 34 歲，其中有大部分都將在 10-20 年內退休，且澳洲電價從上個 10 年至今已上漲近 90%，我們正面臨到因發電容量不足而導致停電的可能性。」吉本斯這樣說，強調澳洲需要重新考慮國家對核能發電的立場。

World Nuclear News, 08/02/2019, 09/06/2019

日本福島第一核電廠污水儲存槽將於 2022 年儲滿

東京電力公司（TEPCO）最近公布的數據顯示，福島第一核電廠中用來儲存已完成處理過程污水的儲存槽，將在 2022 年的夏天裝滿，這也是東電首次就污水儲存槽將於何時達到容量極限給與確切的日期。福島第一核電廠有 3 部機組的爐心受到熔毀的核燃料破壞，至今仍需要使用大量的水來進行冷卻，這些水也就成為受高放射性物質污染的污水，機組周圍的地下水也會滲入反應爐建築內，增加了污水的數量。雖然這些污水在經過處理程序後可移除大多數的放射性物質，唯獨「氚」仍會殘留在水中。根據《日經新聞》的報導，這些污水目前儲存在福島第一核電廠的 960 座污水儲存槽中，容量有近 115 萬噸。

東電至今仍持續設置新的儲存槽，但由於空間有限，可建設的最大容量僅可到 2022 年底的 137 噸。日本在 2018 年財政年間平均每天產生約 170 噸的污水，其中的大部分都是來自地下水，東電期望明年能將這個數值降低到 150 噸，但根據日本官方估計，即使減少地下污水的產量，這些污水儲存槽仍將在 2022 年中儲滿。

目前日本政府正在考慮的一項選擇是將這些處理過的污水稀釋，並逐漸排放到海洋中，但當地漁民強烈反對這項解決方案。根據日本《朝日新聞》報導，日本經濟產業省稍早計畫提出另一項解決方案，即將處理過後的污水長期儲存在電廠以外的地方，但東電對是否能找到願意接納污水儲存槽的社區感到懷疑，且在進行污水轉移時也會面臨到其他的問題。日本政府近期將在進行各方面評估後制定污水處理計畫，計畫內容將包含與地方政府在內等第三方進行協調。

Nuclear Engineering International, 08/22/2019

核四重啓困難 燃料外運並非關鍵

台電公司依據立法院決議持續將核四廠燃料外運，外界質疑核四因此已確定無法重啟。台電指出，核四重啟有其事實上的困難，燃料外運從來都不是關鍵。台電執行燃料外運，每年可節省 1.4 億元保管費用。

經過務實盤點核四重啟的各個面向一安全、法律、工程、預算、商務，台電再次強調，核四重啟需面對各項困難，其中「奇異公司重啟合約談判」、「安全數位儀控系統面臨汰舊更新與備品取得困難」、「廠址地質需重新調查確認是否符合建廠選址或可辦理耐震補強續建」及「預算送立院審查、工程施作需向地方政府申請水保、原能會審查重啟計畫與核准建照」等，多項無法掌控的外部不確定因素，其個別時程皆難估算，且無法掌控 (需時 N 年)。台電公司只能掌握核四 1 號機的工程項目，包括福島安全強化工程、已拆卸設備回裝與試運轉測試、機組啟動測試，及原能會審查各項測試等工作，至少需 7 年。即使核燃料不外運，始終保存於廠內，上述問題並不會自動消失。

台電公司多次強調，核四 1 號機重啟面臨的困難，及所需時程「7+N 年」，均攸關核能安全，不容輕率以對。台電鄭重呼籲各界人士，應誠實面對核四重啟所面臨的多項難題。

本刊訊，2019/9/2

環境輻射監測再增添生力軍！小琉球監測站正式上線

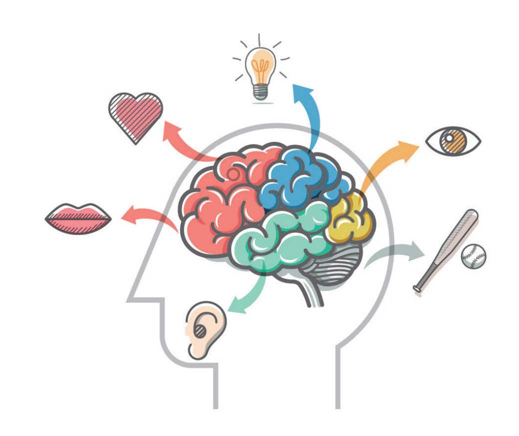
屏東縣小琉球環境輻射自動監測站正式上線！原能會自 108 年 8 月 20 日起，在網站上除了原有的 53 個測站外，新加入小琉球監測站，每隔 5 分鐘更新即時監測數據，民眾動動手指上原能會官網 (www.aec.gov.tw) 或全民原能會 App 就可以看到全國 54 個環境輻射監測站的即時資訊。

原能會在台灣本島及離島地區已經建置 54 個環境輻射監測站，全天候 24 小時連續監測全國環境輻射變化的情形並即時公開，此監測站的增設，擴大了離島地區環境輻射監測範圍，讓民眾更能掌握生活周遭輻射狀況。

本刊訊，2019/8/20



核四廠



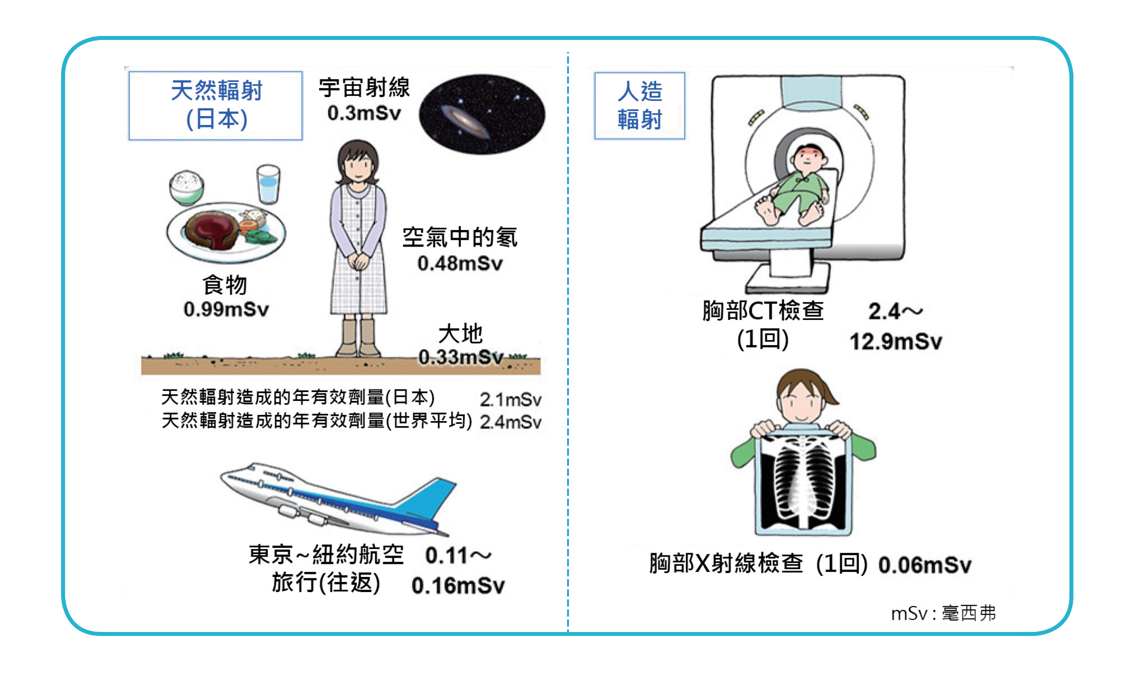
什麼是放射性與輻射？（十六）

譯 朱鐵吉

Q 天然輻射與人造輻射曝露的劑量有什麼不同？

A 日常生活中，我們都在無意識的情況下接受到輻射照射。從宇宙及地表釋出的天然輻射會對我們造成體外曝露，食物與空氣中的氡或天然放射性物質也會造成體內曝露。據估計，世界上每人每年平均會接受 2.4 毫西弗的有效劑量。

依據我國原子能委員會輻射偵測中心公布的「107 年國民輻射劑量評估先期作業研究年度執行報告計畫」的調查，台北—紐約搭機往返所接



受輻射曝露的劑量約 0.187 毫西弗。

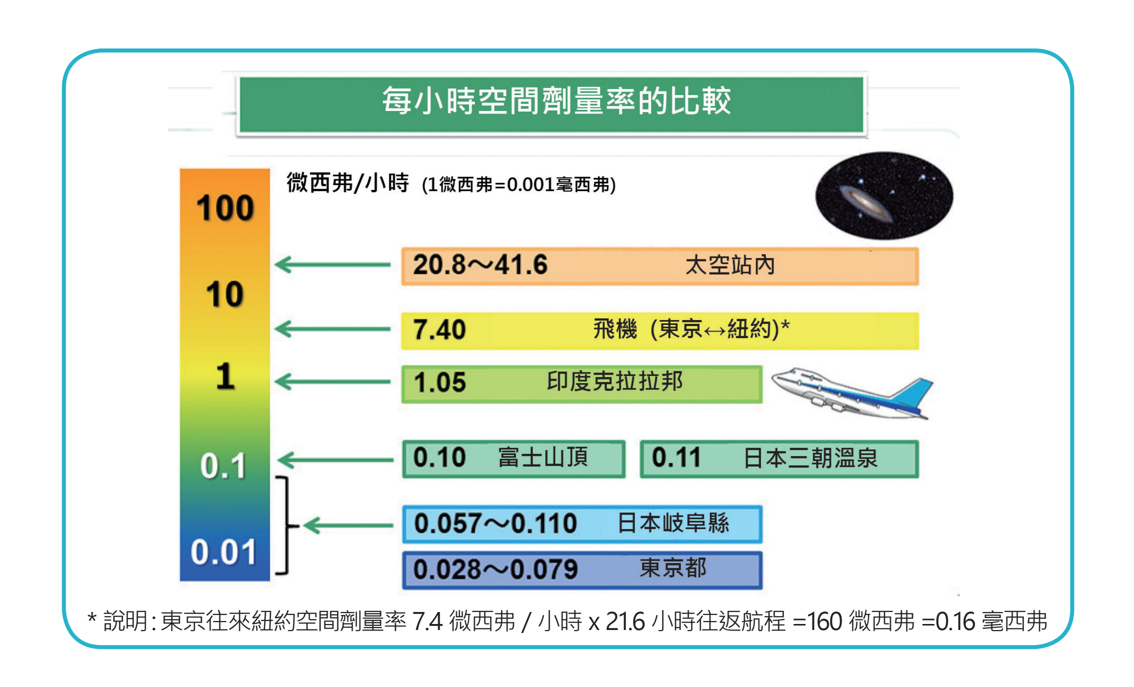
此外，一般人還會因為接受輻射檢查而增加醫療的曝露，其中以接受電腦斷層檢查的醫療曝露為最高，其他還有胃癌檢查，以及上消化道檢查而受到部分的醫療曝露。

Q 從生活環境中接受到的輻射劑量大約有多少？

A 身處於飛行中的飛機機艙內，會接受到銀河及太陽等宇宙射線的高空間劑量率的照射。阿里山的宇宙射線也比平面高出許多，宇宙射線與大氣中的氮或氧等，以及其他原子相互作用後會失去能量，到達地表時，宇宙射線的空間劑量率就降低許多。

人類生活在陸地上接受到的空間劑量率，每小時有效劑量約 0.01-1 微西弗。土壤中的鐳和釷也會釋放出輻射，鐳和釷含量高的土壤釋放出的輻射水平就比較高，這些地區被稱為「高水平天然輻射地區」。

台灣並沒有高天然輻射水平的地區，至於含有氡氣的溫泉如日本的三朝溫泉、土壤中含較多鐳的地區等，都會導致地表輻射水平較高。



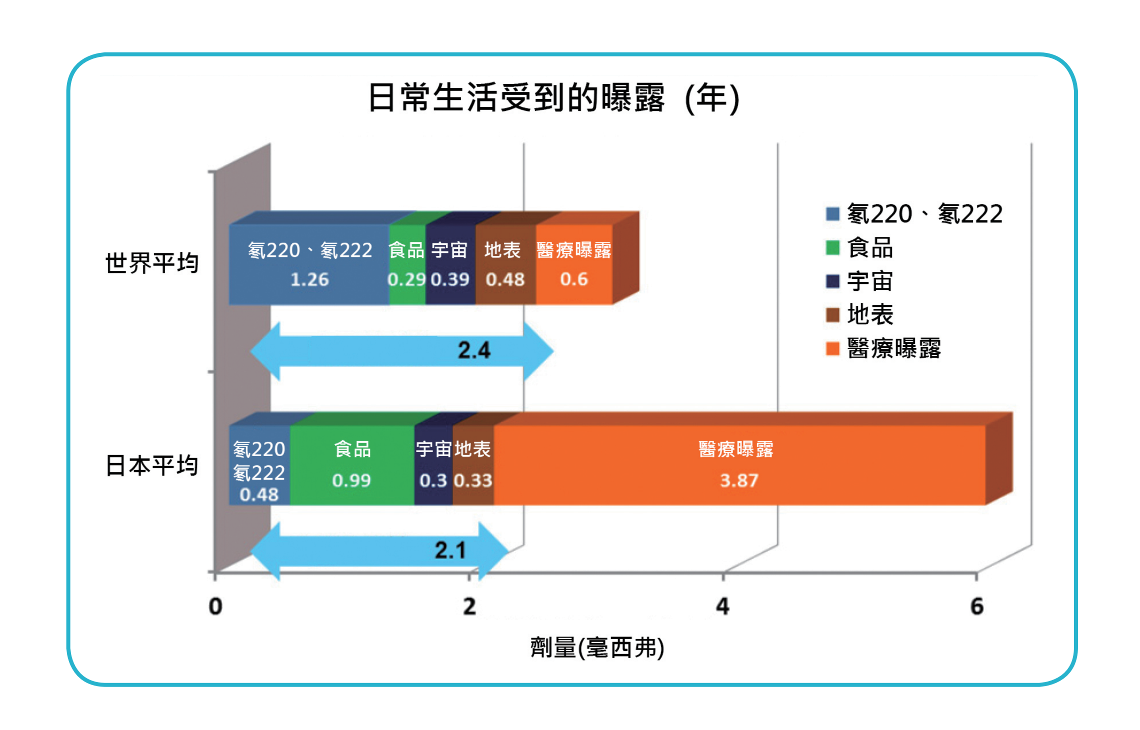
* 說明：東京往來紐約空間劑量率 7.4 微西弗 / 小時 x 21.6 小時往返航程 =160 微西弗 =0.16 毫西弗



A 2011 年 12 月日本原子力安全研究協會發表日本的國民劑量調查結果，日本民眾每年平均接受輻射的劑量為 5.98 毫西弗，其中 2.1 毫西弗是來自於天然輻射的曝露。依據我國原子能委員會輻射偵測中心公布的「107 年國民輻射劑量評估先期作業研究年度執行報告計畫」，台灣地區國民輻射的劑量為 2.44 毫西弗，遠低於日本。

將日本天然輻射內容與世界平均值進行比較，可看到來自氡 222 與氡 220 的輻射曝露較少，食品中的曝露較多，是因為日本人較常食用海鮮，其中鉛 210 及釙 210 放射性核種造成的劑量達 0.8 毫西弗，比世界平均值高。

輻射檢查的曝露劑量因人而異，平均起來日本的曝露量較多，特別是電腦斷層檢查占較高的比例。上述國民劑量的推算值，不包括福島事故所產生的影響。



Q 因天然輻射曝露的劑量大約是多少？

A 下表中，鉛 210 與釙 210 經口攝取占日本民眾體內曝露的劑量升高，鉛 210 及釙 210 是由大氣中的氡 222 衰變產生的，會沉積於地表或河川、海水中進入魚貝類，人體經攝取後造成體內曝露。衰變的路徑：氡 222（半化期 3.8 日）→釙 218（半化期約 3 分鐘）→鉛 214（半化期約 27 分鐘）→鉍 214（半化期約 20 分鐘）→釙 214（半化期約 $1.6x10^{-4}$ 秒）→鉛 210（半化期約 22 年）→鉍 210（半化期約 5 日）→釙 210（半化期約 138 日）。

日本與歐美各國相比，從食品中受曝露的劑量較高，原因是攝取較多的海鮮，因為海鮮中含有較多的釙 210，導致體內有效劑量較高。

另一方面，日本民眾因為氡 222 及氡 220 所造成的劑量較少的原因，是因為日本的建築物通風良好，氡氣較容易擴散至室外。

註：半化期：在生物體系內某一物質（放射性）的量經自然衰變而減至一半所需要的時間。

曝露種類	射源分類	有效劑量 (毫西弗/年)
體外曝露	宇宙射線	0.3
	地表射線	0.33
體內曝露 (吸入攝取)	氡222 (屋內、屋外)	0.37
	氡220 (釷氣) (屋內、屋外)	0.09
	吸菸 (鉛210、釙210等)	0.01
	其他 (鈾等)	0.006
體內曝露 (經口攝取)	主要是鉛210、釙210	0.80
	釷	0.0000082
	碳14	0.01
	鉀40	0.18
合　計		2.1

本單元資料來源：日本環境省《輻射的基礎知識與健康影響》第二章：輻射曝露，p.62-65, 2016
其他參考資料：行政院原子能委員會輻射偵測中心《107 年國民輻射劑量評估先期作業研究年度執行報告》，108 年 7 月。

互相聆聽、開始對話！
核廢社會溝通需要您的參與

世界咖啡館的參與者不是為了喝咖啡而聚集，而是帶動同步對話、分享共同知識，並且有效的在對話中為焦點議題創造新的意義以及各種可能。

世界上已選定核廢處置場址的國家，都是以科學與技術為基礎，透過與公眾及利害關係人的溝通，建立彼此間的互信及信心，逐步推展處置地點的評選作業。
我們也利用世界咖啡館的概念，秉持著「公正的組織體、公開的參與、客觀的標準」的理念，積極和民眾進行對話，擴大議題交流，增加合作互信的基礎，解決核廢爭議。

